

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechaniky

# **Posouzení vlivu výrobní nepřesnosti na koncentraci napětí výztuhy uzavřeného profilu**

Influence of Manufacturing Imperfection on Stress  
Concentration of Profile Stiffener

Student:

Pavel Miňo

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.

Ostrava 2011

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Pavel Miňo**

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3901R003 Aplikovaná mechanika

Téma:

Posouzení vlivu výrobní nepřesnosti na koncentraci napětí výztuhy uzavřeného profilu  
Influence of Manufacturing Imperfection on Stress Concentration of Profile Stiffener

Zásady pro vypracování:

- 1) Popište způsob využití výztuh u strojních součástí, diskutujte možný vliv vrubů a výrobních nepřesností u těchto výztuh,
- 2) Vytvořte konečnoprvkový model poskytnutého testovacího modelu výztuhy s definovanými výrobními nepřesnostmi a proveďte výpočet rozložení napětí pro zadané okrajové podmínky,
- 3) Měřte postupně vytipované rozměry výrobních nepřesností a diskutujte vliv jejich změny na rozložení napětí,
- 4) Získané výsledky přehledně zpracujte v závislosti na měněných vstupních hodnotách výrobních nepřesností a vytipujte další možné parametry mající vliv na rozložení napětí.

Seznam doporučené odborné literatury:

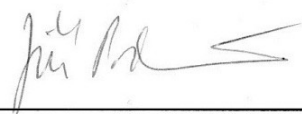
1. ANSYS, Inc. *ANSYS Release 11 Documentation*. SAP IP, Inc., 2007. V elektronické podobě dostupné jako součást instalace programu ANSYS 11.
2. KOLÁŘ, V., NĚMEC, I., KANICKÝ, V. *FEM : Principy a praxe metody konečných prvků*. 1. vyd. Praha : Computer Press, 1997. 401 s. ISBN 80-7226-021-9.
3. COOK, R. D. *Finite Element Modeling for Stress Analysis*. 1st edition. New York : Wiley & Sons, 1995. 320 s. ISBN 0-471-10774-3.
4. KUČERA, J. *Stručný úvod do mechaniky lomu. Část I, Vruby a trhliny, nestabilní lom*. 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská, 1993. 106 s. ISBN 80-7078-218-8.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

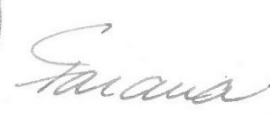
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011

  
doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

## **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

## Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : .....

.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Pavel Miňo

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Jana Čapka 3079, Frýdek - Místek 73801

# **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

MIŇO, P. Posouzení vlivu výrobní nepřesnosti na koncentraci napětí výztuhy uzavřeného profilu. Ostrava: katedra mechaniky, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, XX s. Bakalářská práce, vedoucí: Poruba, Z.

Tato práce má za úkol posoudit vliv výrobní nepřesnosti na koncentraci napětí v zadané geometrii pomocí metody konečných prvků. Geometrií je uzavřený profil, který používá firma Huisman a všechny rozměry byly vybrány z jejich materiálů. Model byl vytvořen v programu Workbench (ANSYS 13). Bylo rozhodnuto zkoumat najednou vliv výrobní nepřesnosti a délky profilu. Výpočet pak provedu opakovaně a za dvou různých okrajových podmínek a výsledkem budou tabulky a grafy, které ukážou, jaký vliv mají zkoumané parametry na koncentraci napětí v kritickém místě, potažmo celé součásti.

# **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

MIŇO, P. Influence of Manufacturing Imperfection on Stress Concentration of Profile Stiffener. Ostrava: Department of mechanic, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-Technical University of Ostrava, 2011, XX p. Bachelor Thesis, head: Poruba, Z.

Task of the work herein is to consider the impact of the production inaccuracy to the concentration of the strain within specified geometry by means of the Finite Element Method (herein after FEM only). Geometry is represented with the closed cross section as used by the Huisman company while any and all dimensions were selected from their materials. Model has been created in Workbench (ANSYS 13) program. A decision has been made to consider both the impact of inaccuracy and length of the section simultaneously. The calculation would be performed repeatedly under two different limit conditions, said would result in tables and graphs showing the influence of tested parameters to the strain concentration at critical location, pertinently of the entire part.

# OBSAH

|  |    |
|--|----|
| 1. Úvod .....  | 9  |
| 2. Výztuhy .....   | 10 |
| 2.1 Typy výztuh .....  | 10 |
| 2.2 Používané technické postupy .....                                | 11 |
| 3. Základy z mechaniky lomu .....                                    | 14 |
| 3.1 Úvod .....   | 14 |
| 3.2 Iniciátory lomu těles .....                                      | 16 |
| 3.2.1 Konstrukční vruby .....  | 19 |
| 3.2.2 Trhliny .....  | 21 |
| 4. Metoda konečných prvků .....                                      | 22 |
| 4.1 Úvod .....   | 22 |
| 4.2 Klasifikace prostředků a postupů při použití MKP .....           | 23 |
| 4.3 Singularity ve výpočtech konstrukcí .....                        | 23 |
| 5. Tvorba počítačového modelu .....                                  | 25 |
| 5.1 Úvod .....   | 25 |
| 5.2 Jednotlivé kroky .....   | 25 |
| 5.2.1 Inženýrská data .....  | 26 |
| 5.2.2 Vytvoření geometrie modelu .....                               | 26 |
| 5.2.3 Vytvoření sítě konečných prvků .....                           | 29 |
| 5.2.3.1 Volené typy elementů .....                                   | 31 |
| 5.2.4 Zadání okrajových podmínek .....                               | 32 |
| 6. Výpočet a výsledky .....  | 34 |
| 6.1 Výpočet pro okrajové podmínky A .....                            | 34 |
| 6.1.1 Vypočtené maximální hodnoty napětí ve vrubu .....              | 38 |
| 6.1.2 Komplexní hodnocení výsledků .....                             | 40 |
| 6.2 Výpočet pro okrajové podmínky B .....                            | 41 |
| 6.1.1 Vypočtené maximální hodnoty napětí ve vrubu .....              | 45 |
| 6.1.2 Komplexní hodnocení výsledků .....                             | 47 |
| 6.3 Studie nárustu napětí uprostřed součásti v závislosti na N ..... | 48 |
| 6.4 Důvody pro výrobní postupy užívané firmou Huisman .....          | 50 |
| 7. Závěrečné zhodnocení .....  | 53 |
| 8. Final Conclusion .....  | 54 |
| 9. Použitá literatura .....  | 55 |
| 10. Poděkování .....   | 56 |

## SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

| Veličina               | Označení                         | Jednotka             |
|------------------------|----------------------------------|----------------------|
| $\sigma_{kr}$          | Kritické napětí                  | [MPa]                |
| $\sigma_x$             | Napětí ve směru osy x            | [MPa]                |
| $\sigma_y$             | Napětí ve směru osy y            | [MPa]                |
| $\sigma_z$             | Napětí ve směru osy z            | [MPa]                |
| $\varepsilon_z$        | Poměrná deformace ve směru osy z | [-]                  |
| E                      | Modul pružnosti materiálu v tahu | [MPa]                |
| $\mu$                  | Poissonova konstanta             | [-]                  |
| $\alpha_t$             | Součinitel koncentrace napětí    | [-]                  |
| $\sigma_{max}$         | Maximální napětí ve vrubu        | [MPa]                |
| $\sigma_n$             | Nominální napětí                 | [MPa]                |
| $\rho$                 | Poloměr zaoblení vrubu           | [mm]                 |
| $K_I, K_{II}, K_{III}$ | Součinitele intenzity napětí     | [-]                  |
| $\rho_{ocel}$          | Hustota oceli                    | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| L                      | Délka profilu                    | [mm]                 |
| N                      | Výrobní nepřesnost               | [mm]                 |
| $\alpha$               | Úhel zkosení výztuhy             | [°]                  |
| h                      | Hloubka vrubu                    | [mm]                 |
| w                      | Šířka desky                      | [mm]                 |
| t                      | Čas                              | [s]                  |
| K                      | Koeficient nárustu napětí        | [-]                  |

# 1 Úvod

V této práci se sleduje průběh napětí ve výztuze uzavřeného profilu od firmy Huisman v závislosti na měnících se parametrech. Těmi jsou délka a především výrobní nepřesnost. Ta vzniká uprostřed profilu jako přesazení vlivem špatného svaření. Na přání zadavatele bude výpočet proveden pro dva druhy okrajových podmínek

Účelem této práce je zjistit a popsat, jaký vliv mají tyto parametry na napětí, které v profilu vzniká. K tomu bude využita metoda konečných prvků, konkrétně program ANSYS Workbench 13, ve kterém bude tento profil modelován.

Cílem této práce je pak zpracování výsledků do přehledných tabulek a grafů tak, aby je v případě potřeby mohl konstruktér rychle použít. Nakonec bude také provedena diskuze nad získanými výsledky, ve které bude poukázáno na všechny zajímavé poznatky získané díky této práci.

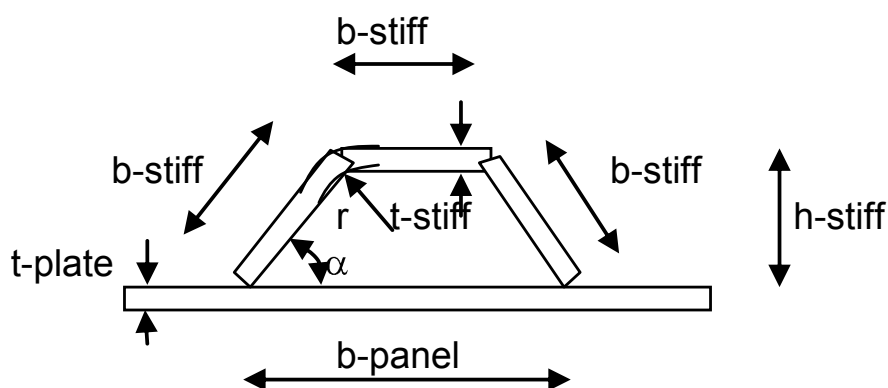


## 2 Výztuhy

Výztuhy se používají u relativně tenkých a dlouhých desek jako opatření proti jejich možné deformaci (zborcení). Existuje nepřeberné množství používaných výztuh, které se mohou lišit svým tvarem, tloušťkou a také svým účelem.

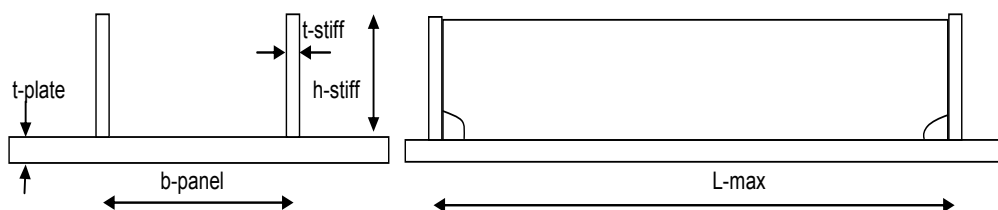
Předmět této práce je posoudit a vyhodnotit průběh napětí ve výztuze uzavřeného profilu (kanálové), kterou používá právě firma Huisman (Obr. 2.1.1). Tato výztuha se používá v tělech jeřábů tam, kde se předpokládá namáhání tahem.

### 2.1 Typy výztuh

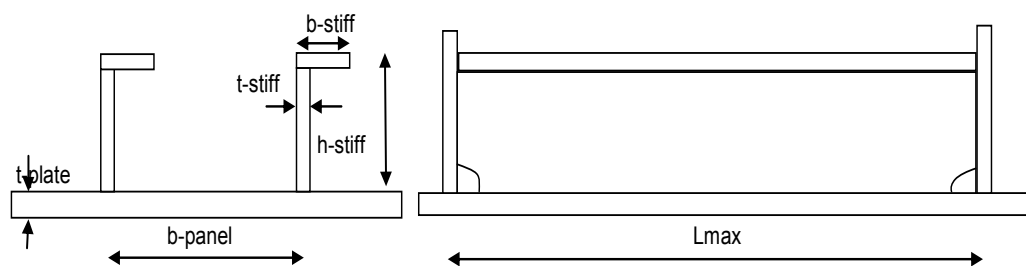


**Obr. 2.1.1** Kanálová výztuha [5]

Z materiálů od firmy Huisman bylo vybráno pro názornost pár dalších používaných typů výztuh:



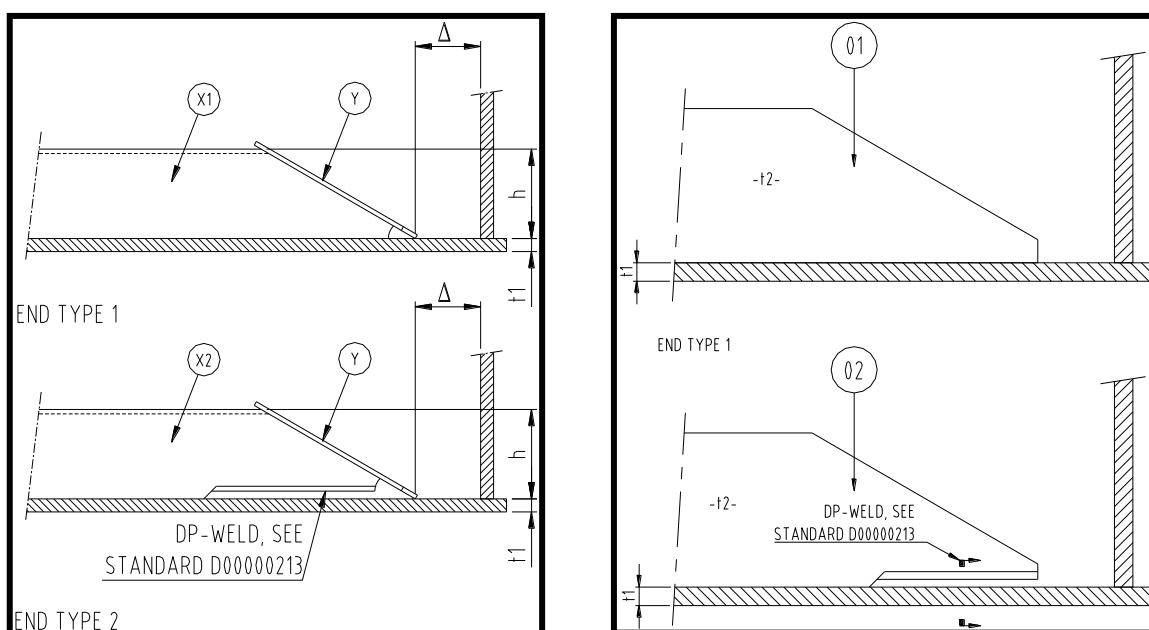
**Obr. 2.1.2** Desková výztuha [5]



**Obr. 2.1.3** L-desková výztuha [5]

## 2.2 Používané technické postupy:

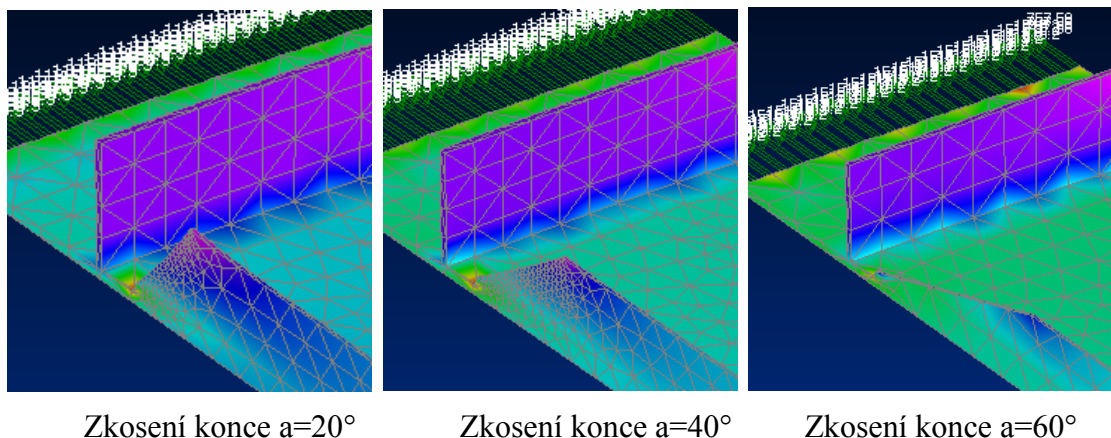
### a) Ukončení výztuh



**Obr 2.2.1** Typické příklady ukončení výztuh [5]

Zkosení výztuhy na konci nijak nesnižuje její sílu a vlastnosti. Naopak zkosení pod úhlem  $30^\circ$  přináší dostatečné zmenšení koncentrace napětí. Zkosené výztuhy mají také lepší odpor proti střídavému napětí ve směru výztuhy. [5]

Studie provedená jako ukázka koncentrace napětí pro různé úhly zkosení konce výztuhy [5]:



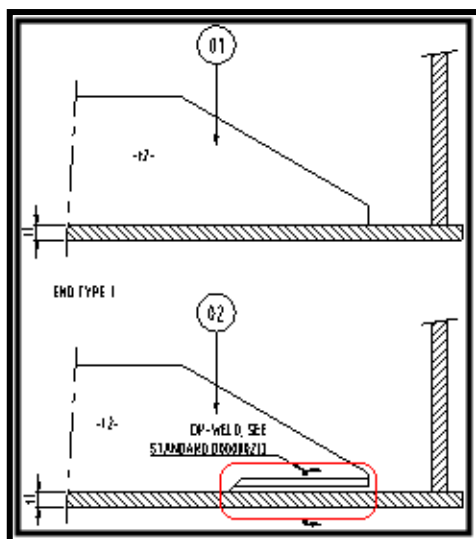
**Obr. 2.2.2** Změna napětí pro různé úhly zkosení konce výztuhy

#### b) Přivaření výztuh

Při přivařování výztuh se používají určité praxí prověřené postupy, díky kterým se snižuje koncentrace napětí anebo plní některé technologické požadavky (např. aby se někde nezadržovala voda).

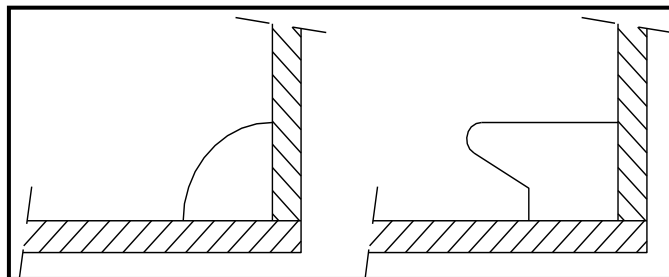
Mezi dva hlavní používané postupy patří:

- 1) Podřezání výztuhy na jejím konci a vyvaření tohoto místa.



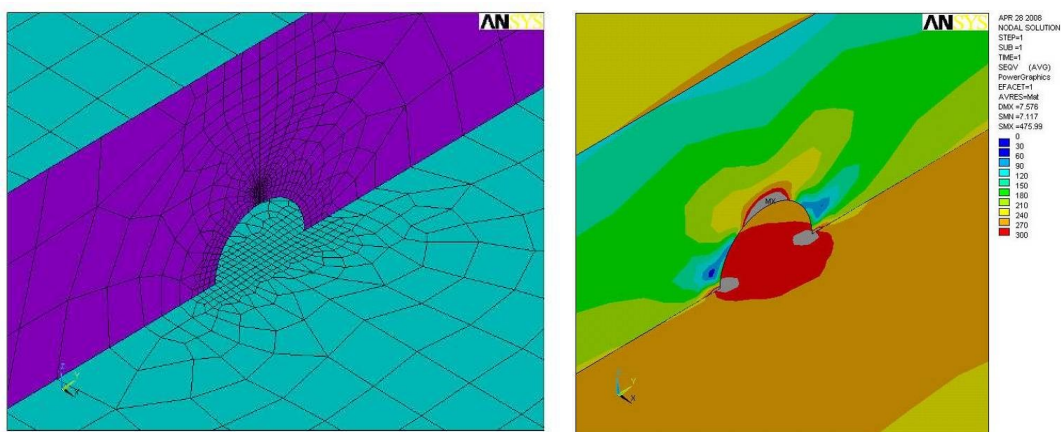
**Obr. 2.2.3** Podřezání před svařováním [5]

- 2) Odlehčení materiálu v koutech (Obr. 2.2.4) – použití tzv. KEY a MOUSE otvorů pro snížení koncentrace napětí v koutech

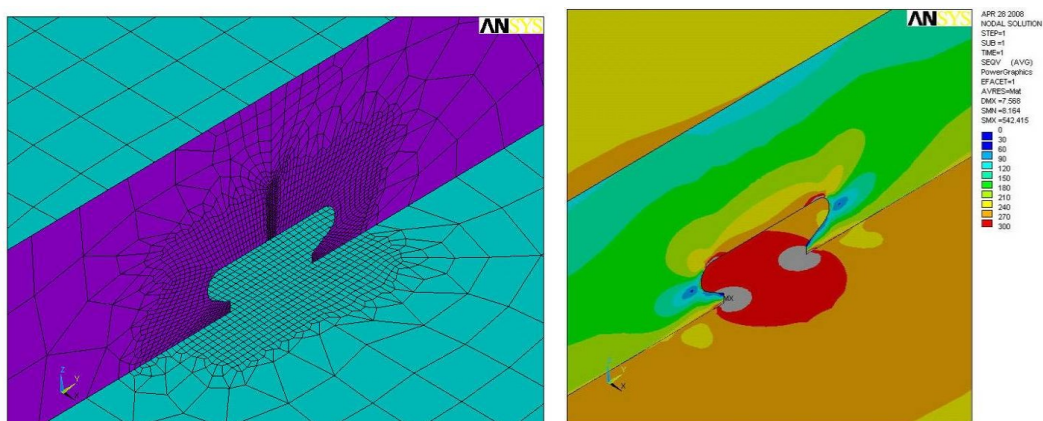


**Obr. 2.2.4** Mouse a Key otvory

Napěťová analýza v místě KEY a MOUSE díry [5]. (Obr. 2.2.5 a Obr. 2.2.6)



**Obr. 2.2.5** Maximální napětí pro tradiční MOUSE otvor je 475 MPa.



**Obr. 2.2.6** Maximální napětí pro KEY otvor je 542 MPa.

## 3 Základy z mechaniky lomu

### 3.1 Úvod

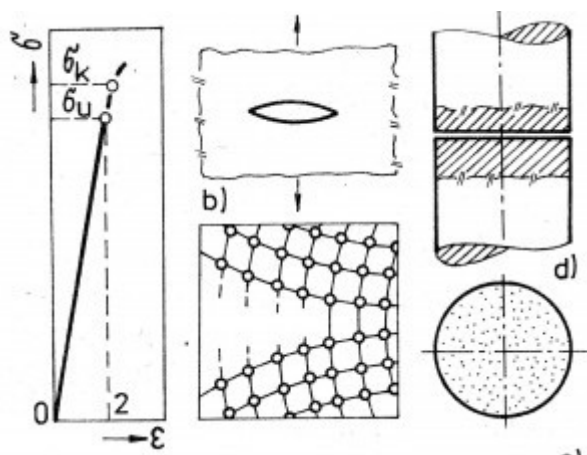
Kvůli honbě za neustálými úsporami a co největšímu zisku jsou konstruktéři nuceni snižovat hmotnost strojů a ocelových konstrukcí na minimum. S tím souvisí vzrůst napětí a deformací v takto oslabených součástech zařízení. Proto je u těchto součástí často i životně důležité, aby si konstruktér velice dobře uvědomoval nebezpečí a úskalí, které představují konstrukční vruby a defekty struktury. Pak je zejména u úsporně navržených součástí nutno postupovat podle teorií mezních stavů. Pojmem mezní stav se rozumí ztráta schopnosti konstrukce plnit funkci pro kterou byla navržena.

Příklady mezních stavů [1]:

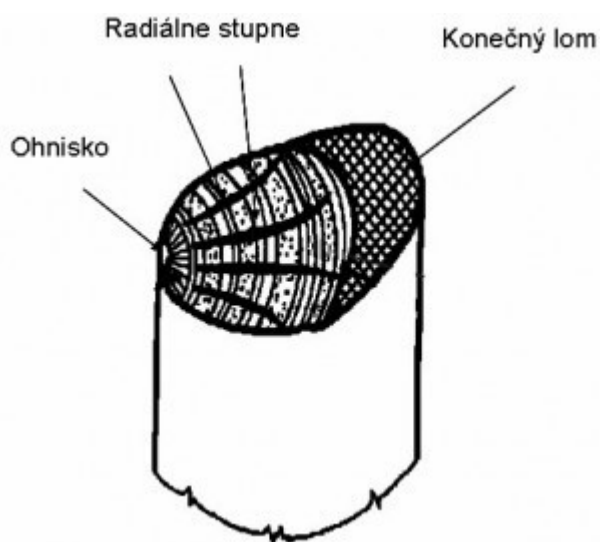
- 1) Ztráta stability tvaru (vzpěr),
- 2) ztráta funkční schopnosti nadměrnou plastickou deformací,
- 3) únavový lom (Obr. 3.1.2 a Obr. 3.1.3),
- 4) lom za koroze pod napětím,
- 5) lom při tečení za vyšších teplot,
- 6) křehký lom (Obr. 3.1.1),
- 7) lom způsobený kombinací únavy a koroze nebo únavy a creepu.

Mechanika lomu je mladá vědní disciplína, která byla pro současnou dobu velmi potřebná. Díky ní jsou klasické pevnostní výpočty doplněny možnostmi respektovat při dimenzování strojních součástí vliv konstrukčních vrubů a vad materiálu různé ostroty až po trhliny.

Bylo by asi na místě ještě zmínit, že s použitím lomové mechaniky v praxi v klasických pevnostních výpočtech se pravděpodobná chyba výpočtu pohybuje v okolí 20%, při použití moderní výpočetní techniky pak v okolí 10% [1].



**Obr. 3.1.1** Schéma vzniku křehkého lomu.



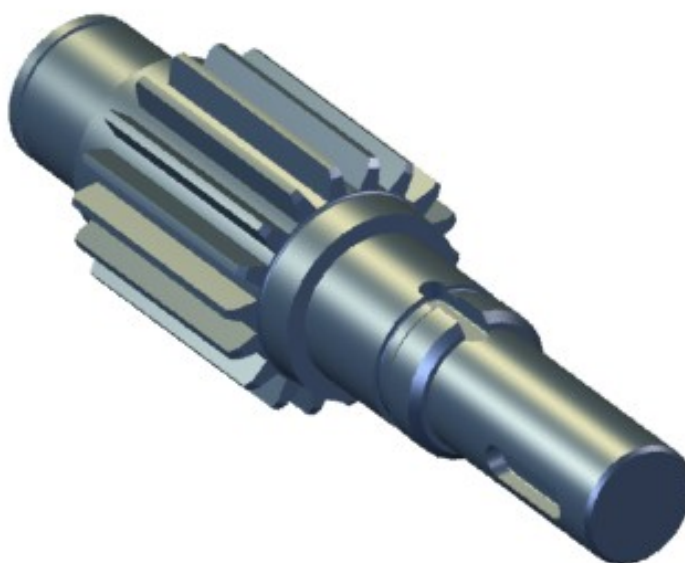
Únavový lom: **Obr. 3.1.2** Schéma únavového lomu a jeho stádií

**Obr. 3.1.3** Snímek skutečného únavového lomu

### 3.2 Iniciátory lomu těles

Hlavními zdroji lomů částí strojních a ocelových konstrukcí jsou náhlé změny tvaru, poruchy struktury, přítomnost napětí I. druhu od svařování nebo tepelného zpracování a degradace mechanických vlastností materiálu s časem [1]. Už při tomto výčtu je vidět, že zadaný profil může být lomem silně ohrožen.

První z iniciátorů se nazývají **konstrukční vruby**. Ty bývají nezbytné pro správnou funkci součástí. Konstruktor má však velkou výhodu, neboť je to on, kdo rozhoduje o jejich geometrii, umístění v součásti a také o velikosti nominálního napětí v jejich okolí. Vzhledem k jejich dobré přístupnosti lze kontrolovat dodržení jejich tvaru a určit teoreticky nebo experimentálně špičky napětí a deformací v nejhorším místě.



**Obr. 3.2.1** Drážkovaný hřídel

Na Obr. 3.2.1 je běžná strojní součást – drážkovaný hřídel. I přes to, že není nijak velká, objevuje se na ni spousta konstrukčních vrubů (drážkování, drážka pro pero, rádiusy, zápich). Konstruktor musí být velmi obezřetný zejména u těchto míst, ve kterých se koncentruje napětí a hrozí poškození součásti.

Částečně by se ke konstrukčním vrubům daly přiřadit i **svarové spoje** a to především proto, že o jejich poloze, tvaru svarových ploch, způsobu tepelného zpracování a kontrole rozhoduje opět konstruktér. Zde lze ale diskutovat, neboť vlastní svary mají strukturu odlišnou od okolního materiálu a vyznačují se zvýšenými napětími I. druhu. Proto je lze počítat i mezi vruby strukturní.

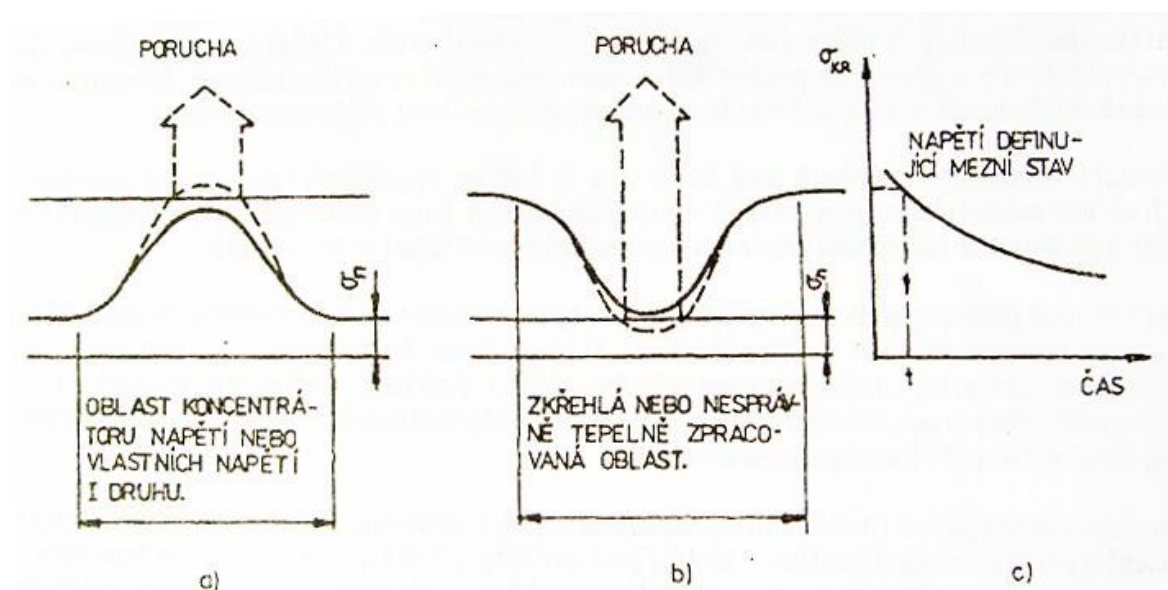
**Strukturní vruby**, na rozdíl od vrubů konstrukčních nejsou plánovány předem. Vznikají vlivem technologických procesů při výrobě a na výrobcích jsou často zjistitelné pouze metodami nedestruktivní defektoskopie. Většinou se však tyto drobné nehomogenity zjistí až po porušení části provozované určitou dobu.

Část porušeného tělesa [1]:

- 1) Obsahuje necelistvosti ve tvaru dutin (bubliny, vločky a trhliny),
- 2) je zkřehlá,
- 3) je poškozená nesprávným tepelným zpracováním.

**Degradace mechanický vlastností materiálu s časem** je důležitý proces, který je nutno při dimenzování těles uvažovat. Z účinků snižujících postupně pevnost materiálu uvedu stárnutí, nebo také např. radiační ozáření materiálu v primárních okruzích jaderných elektráren.





**Obr. 3.2.2** Schematické porovnání účinku konstrukčního a strukturního vrubu v poli napětí od vnějších sil a vlastních napětí I. druhu: [1]

Obr. 3.2.2 a) V případě konstrukčního vrubu je kritické napětí  $\sigma_{kr}$  v čase  $t$  konstantní a nominální napětí se k němu přibližuje vlivem účinku vrubů. K poruše dochází, když napětí od vnějších sil a vlastních napětí zvýšené příslušným koncentrátorem převyší kritické mezní napětí.

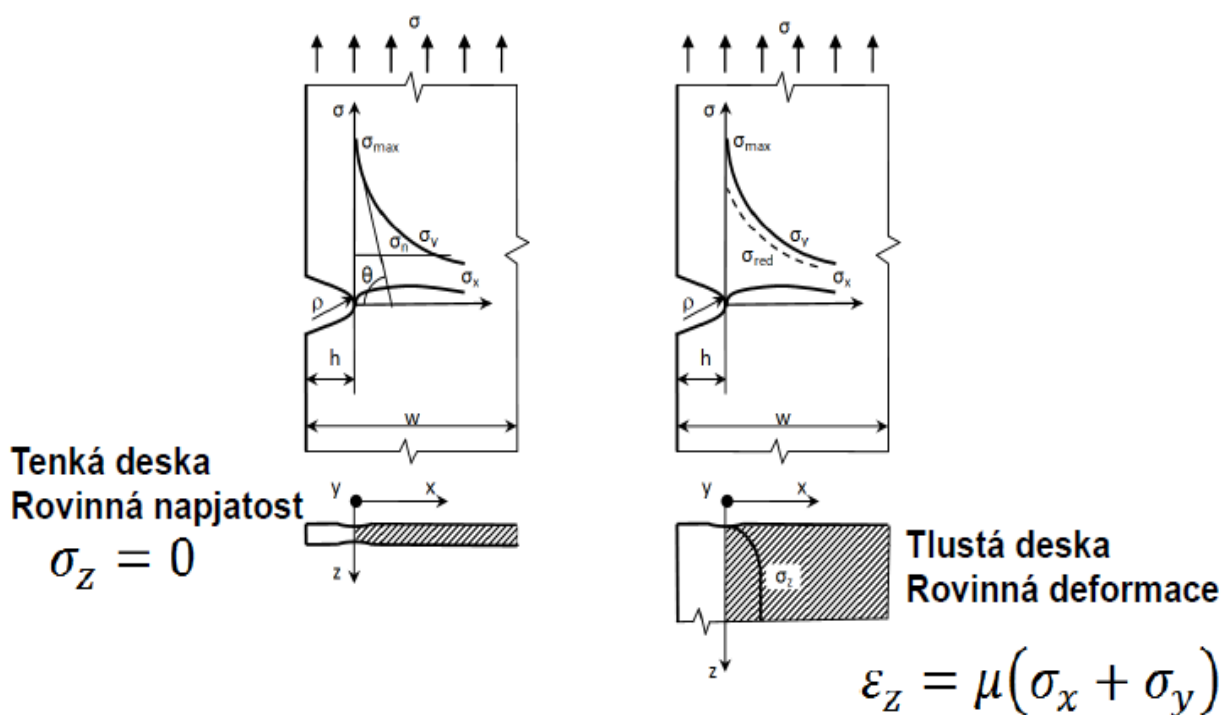
Obr. 3.2.2 b) V tomto případě jsou charakteristiky definující mezní stav lokálně sníženy strukturním vrubem, jako je např. zkřehlá oblast nebo oblast špatně tepelně zpracovaná. K poruše dojde, když toto snížení podkročí nominální napětí od vnějších sil.

Obr. 3.2.2 c) V obou případech je kritické napětí  $\sigma_{kr}$  funkcí času, která vyjadřuje vliv stárnutí, radiačního ozáření a jiných degradačních procesů.

### 3.2.1 Konstrukční vruby

Náhlé změny tvaru jako jsou otvory, drážky, osazení atd. vedou ke vzniku víceosé napjatosti vlivem příčné kontrakce materiálu. Element materiálu těsně pod vrubem se vlivem většího napětí  $\sigma_y$  zúží více nežli jeho soused ve směru osy  $x$ . Pokud je deska s vrubem tenká, zúží se v blízkosti vrubu a napětí ve směru tloušťky  $\sigma_z$  se přibližně rovná nule (Obr. 3.2.1.1). U tlustých desek je toto možné pouze u povrchu. Ve větší vzdálenosti od povrchu je posunutí libovolného bodu tělesa ve směru osy  $z$  omezeno okolím a lze předpokládat, že poměrné prodloužení  $\varepsilon_z = 0$  a napětí  $\sigma_z$  dosáhne maximální hodnoty, která bude podle Hookeova zákona [1]:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_z - \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_y)] = 0 \quad \rightarrow \quad \sigma_z = \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_y)$$



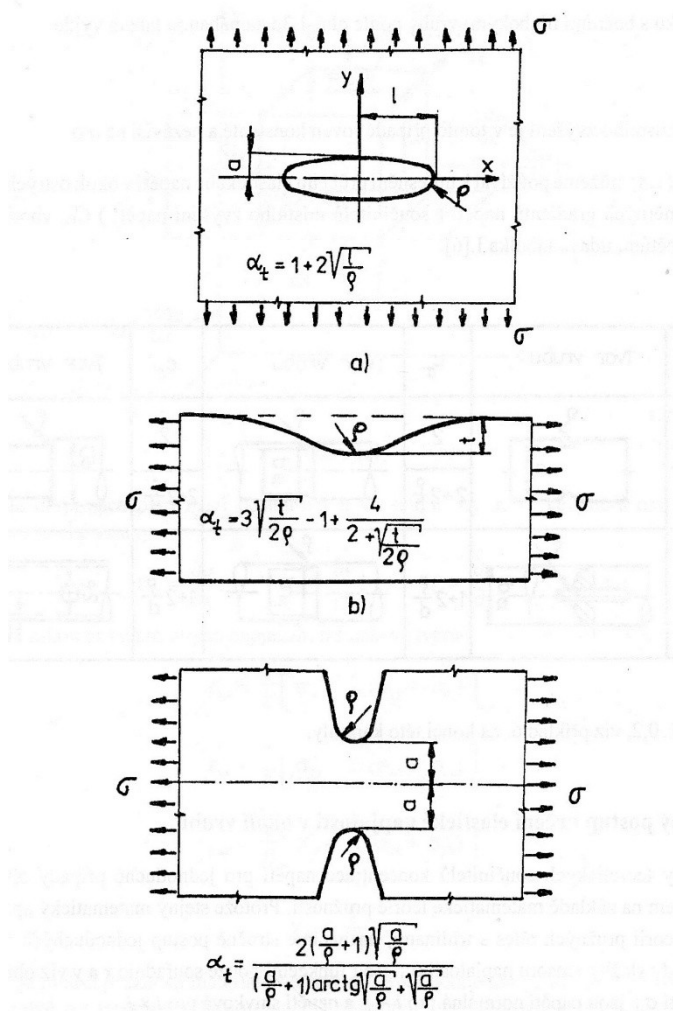
*Obr. 3.2.1.1 Průběhy napětí v kořeni vrubu [1]*

Teoretický součinitel koncentrace napětí, který je definován jako vzrůst napětí v oblasti elastických napětí:

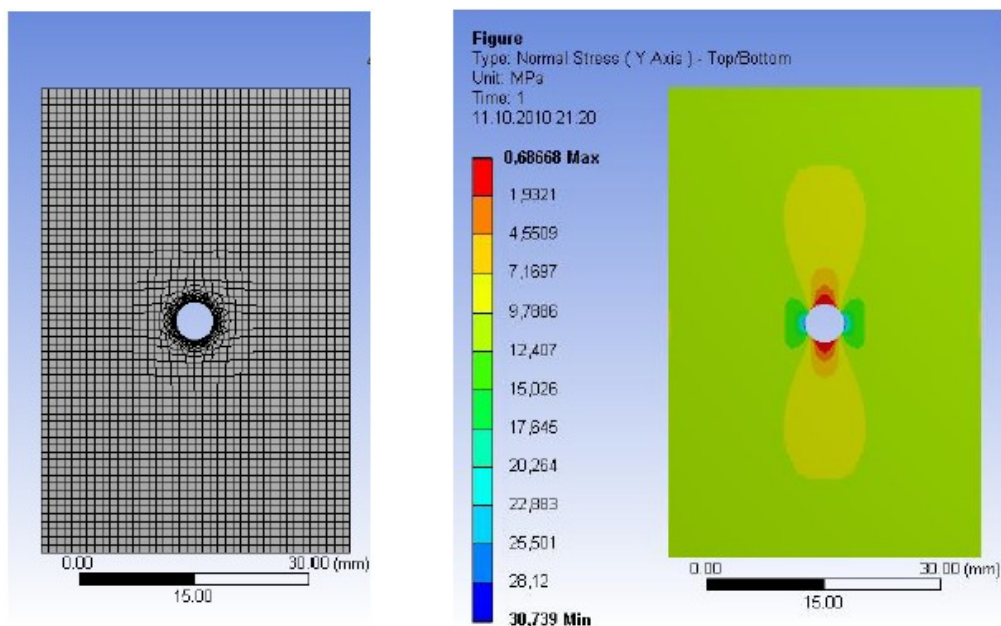
$$\alpha_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad [1]$$

, kde  $\sigma_n$  je nominální (průměrné) napětí v konstrukci – napětí počítané ve stejném místě pro součást bez vrubu a  $\sigma_{max}$  je maximální napětí, které vznikne ve vrubu.

$\alpha_t = f(h/\rho)$  - Součinitel koncentrace napětí je funkce tvaru vrubu, která se dá vypočíst (viz obr. 3.2.1.2). Ve strojní praxi jsou už taky poměrně známé hodnoty tohoto součinitele pro některé typy vrubu.



**Obr. 3.2.1.2** Vztahy pro výpočet součinitele koncentrace napětí pro některé případy. [1]

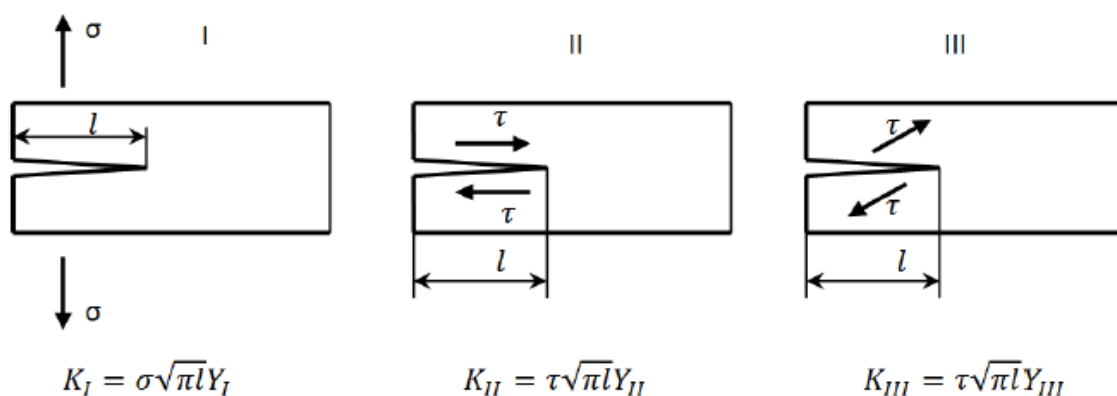


**Obr. 3.2.1.3.** Speciální případ – kruhový otvor: platí  $\sigma_{max} = 3 \cdot \sigma_n$

### 3.2.2 Trhliny

Trhlinu v tělese lze považovat za vrub s maximální ostrostí kořene. Základní charakteristikou napěťového pole v bezprostředním okolí čela trhliny je součinitel intenzity napětí. U trhlín rozlišujeme 3 základní způsoby zatížení a každý z nich má vlastní součinitel (Obr. 3.2.2.1).

#### 3 mody zatěžování – Součinitel intenzity napětí $K_I$ , $K_{II}$ , $K_{III}$



**$Y$  je bezrozměrná funkce tvaru tělesa a způsobu zatížení.**

**Obr. 3.2.2.1** 3 základní mody zatížení trhlín. [1]

## 4 Metoda konečných prvků

### 4.1 Úvod

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin atd. na vytvořeném fyzikálním modelu. Její princip spočívá v rozdělení spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. MKP je užívána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického (nejnamáhanějšího) místa konstrukce. Ačkoliv jsou principy této metody známy již delší dobu, k jejímu masovému využití došlo teprve s nástupem moderní výpočetní techniky.

Metoda konečných prvků je vlastně z hlediska matematiky [4]:

- v širším smyslu numerickou metodu řešení (parciálních) diferenciálních rovnic (v kontinuu)
- v užším smyslu jen techniku diskretizace definičního oboru hledaných funkcí (techniku diskretizace kontinua). Vlastní podstatou řešení je pak některá z variačních metod.

Ukázalo se, že MKP je velice silná právě při řešení úloh mechaniky poddajných těles. Proto se MKP v poslední době stala téměř jediným prostředkem numerické analýzy mechanických soustav poddajných těles. Své místo si našla ve velkém množství inženýrských programů, ať už v tradičně velkých čistě analytických aplikacích jako je např. ANSYS, ADINA, NASTRAN, MARC, ad. a nebo také i v systémech CAD jako prostředek pro rychlé návrhové výpočty.

V souvislosti s MKP vzniká v širším podvědomí pár nebezpečných mýtů a z nich nejnebezpečnějším je slepá víra, že vypočtené výsledky jsou správné. Za správnost výsledků ručí výpočtář, nikoli metoda. Metodu lze použít nevhodným způsobem jak z hlediska vlastního modelování mechanické soustavy (např. rozhodování zda užít 1D, 2D či 3D kontinuum, skořepiny, nosníky, elastický nebo inelastický materiálový model) tak i z hlediska použitých výpočtových postupů - lineární či nelineární, statický či dynamický.

## 4.2 Klasifikace prostředků a postupů při použití MKP

Než jsem se v posledních semestrech seznámil detailněji s metodou konečných prvků, myslel jsem, že jako výpočtář budu ve své profesi používat matematicky exaktní postupy narozdíl od konstruktérů, kteří se při své práci opírají hlavně o své zkušenosti, cit a intuici.

Tohle byla ovšem jen velmi nebezpečná iluze, protože jediná věc, která pracuje exaktně je pouze vlastní matematický výpočet. Nejnáročnější činností je tvorba mechanického modelu, při které se výpočtář stejně jako konstruktér musí opřít především o svůj názor, zkušenosti, cit a intuici. K tomu všemu se mu dostává omezená, ale vlastně dostatečně široká škála prostředků, které může při své práci využít. Tím se vlastně dostává do situace nepříliš odlišné od té, se kterou se musí potýkat i konstruktér.

Konstruktér se na začátku své kariéry začíná seznamovat se základními prvky a částmi strojů, řeší jednoduché a běžné situace a s postupem času a nabitými zkušenostmi se učí zvládnout stále složitější konstrukce. Výpočtář (prvkař) se nejprve seznámí s fyzikálním a matematickým základem metody a pak si osvojuje modelování jednotlivých těles s využitím klasických (1,2 a 3D) kontinuí, deskových, skořepinových a nosníkových elementů, modeluje několik těles s vazbami, řeší nelineární úlohy, dynamiku, a nakonec se naučí vytvářet modely celých zařízení (soustav těles) a provádět simulace jejich provozu. Klasifikace dostupných prostředků MKP je předpokladem jejich správného použití v praxi.

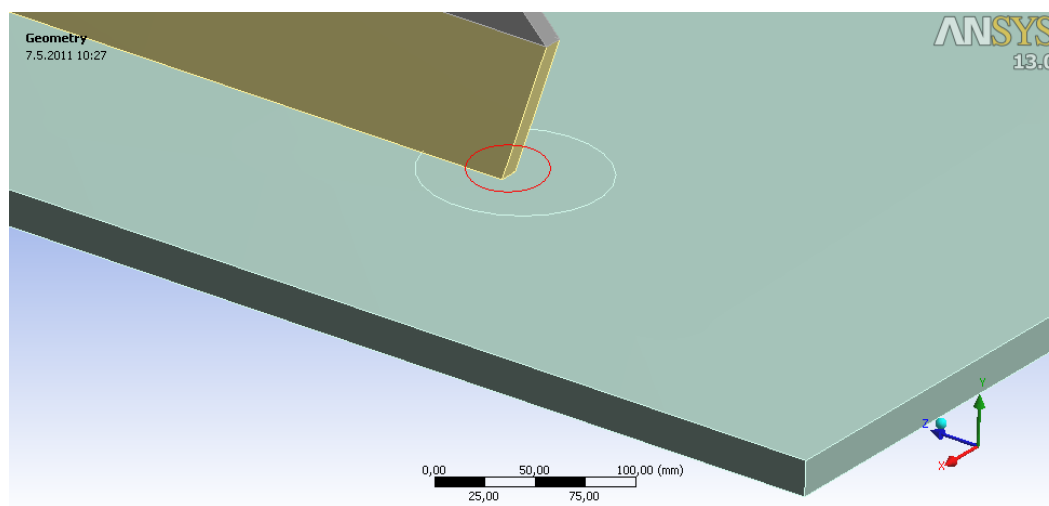
## 4.3 Singularity ve výpočtech konstrukcí

Rostoucí výkon počítačů i výpočtových programů pro řešení konstrukcí přináší nový problém. Jedná se o problém singulárních bodů v modelu řešené konstrukce, tj. bodů, kde teoretické řešení dává nekonečné vnitřní síly, resp. napětí a numerické řešení k nekonečnu konverguje se zhušťováním dělení. Obecně je možno říct, že záchrana z této situace je jedinečně v tom, že i když vnitřní síly, resp. napětí konvergují v singulárních bodech k nekonečnu, má jakýkoliv integrál vnitřních sil po úsečce (respektive integrál napětí po ploše), procházející tímto bodem konečnou hodnotu. Vzhledem k tomu, že v okolí singulárního bodu materiál zplastizuje a dojde k redistribuci vnitřních sil, je možno pro posouzení, resp. pro dimenzování použít průměrnou hodnotu příslušné vnitřní síly na

úsečce jisté délky, resp. jisté ploše, povoluje-li to norma. V každém případě při lineárním řešení úlohy není možné problém ošetřit jiným způsobem [2].

Typické singularity vyskytující se na modelech konstrukcí:

- Působíště osamělých břemen či momentů,
- bodové podpory ať už pevné či pružné,
- konec nebo zlom liniového podepření,
- nezaoblený kout povrchu (Obr. 4.3.1).



**Obr. 4.3.1** Ostrá hrana zachována v místě připojení výztuhy – singulární místo

## 5 Tvorba počítačového modelu

### 5.1 Úvod

Výpočet této bakalářské byl proveden v programu Workbench, který patří k programu ANSYS 13. Práce ve Workbenchu je velice přehledná, program je pro uživatele velmi inteligentně nastaven a člověk tak snadno najde vše, co potřebuje k rychlé práci. Celý základ programu, hlavně tedy modelář připomíná práci s programy CAD.



*Obr. 5.1.1 Nejnovější verze programu ANSYS - logo*

Úkolem je spočítat napětí na zadané součásti (výztuha uzavřeného profilu) v závislosti na dvou parametrech. Těmi jsou délka výztuhy a výrobní nepřesnost. Oběma těmito parametřům byly přiřazeny 4 hodnoty, jejichž vzájemnými kombinacemi vznikne 16 modelů. Po výpočtu bude určeno, jaké mají tyto parametry vliv na koncentraci napětí v součásti. Celá úloha bude simulována pomocí lineární statiky.

### 5.2 Jednotlivé kroky

V této kapitole se pokusím rozčlenit práci postupně podle kroků, kterými jsem procházel, než jsem se dostal k výpočtům. V jednotlivých částech budou probrány a popsány navržené parametry a zároveň vysvětleno, proč byly zvoleny právě takto.

Práce na modelu byla rozdělena do následujících částí:

- 1) Inženýrské data,
- 2) vytvoření geometrie modelu,
- 3) vytvoření sítě konečných prvků,
- 4) zadání okrajových podmínek.



## 5.2.1 Inženýrská data

V této části šlo o volbu materiálu. Jelikož nebyly dány žádné speciální požadavky na materiál součásti, byla zvolena běžná konstrukční ocel, která v programu již byla definována. Tato ocel má typické parametry pro tento druh materiálu.

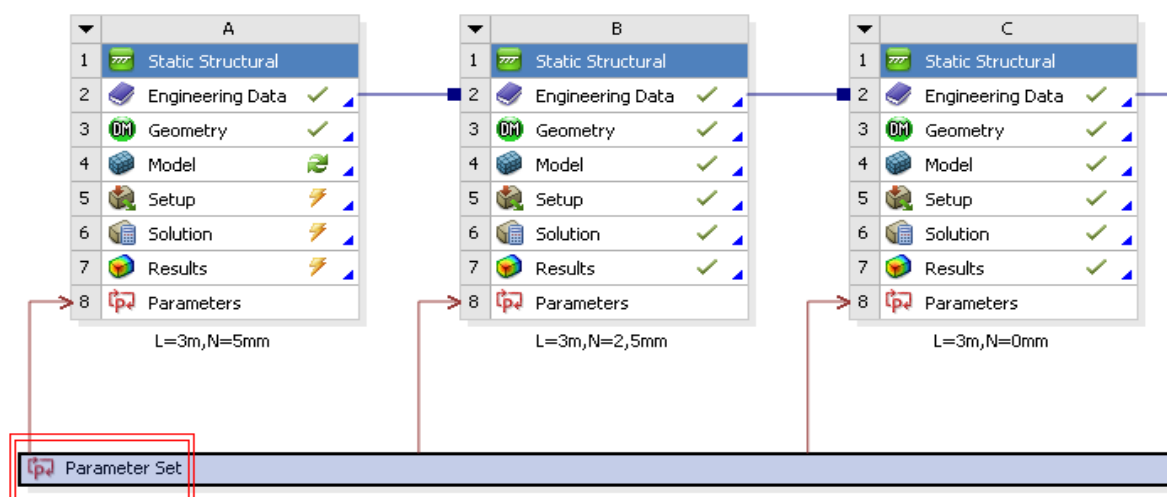
$$E = 200\,000 \text{ MPa}$$

$$\mu = 0,3$$

$$\rho_{\text{ocel}} = 7\,850 \text{ kg/m}^3$$

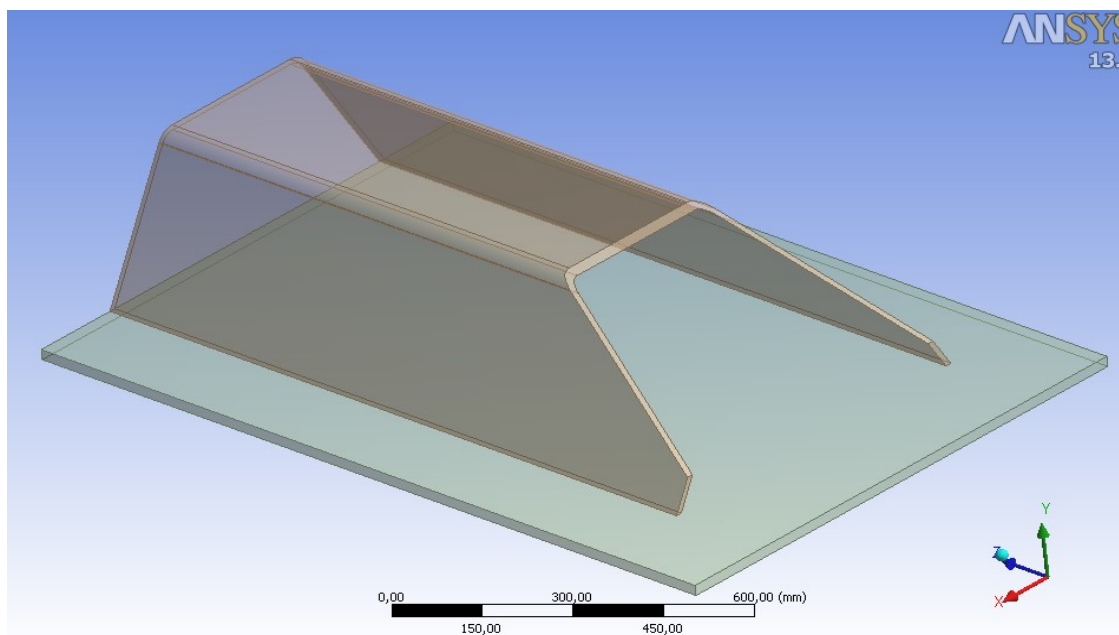
## 5.2.2 Vytvoření geometrie modelu

Pro tvorbu geometrie využívá Workbench modul DesignModeler. Práce v něm je rychlejší a přehlednější než v normálním ANSYSU. Jelikož jsem pro dosažení výsledků potřeboval 16 modelů, ve kterých se mají měnit zadané proměnné parametry (délka výztuhy, výrobní nepřesnost), využil jsem během modelování parametrické zadávání rozměrů (Obr. 5.2.2.1). Touto volbou mi Workbench značně urychlil a usnadnil práci, protože místo toho abych 16x dělal velmi podobné modely, stačilo udělat jeden a v jeho kopiích pak změnou parametrů ho program sám upraví do požadovaného tvaru. [3]



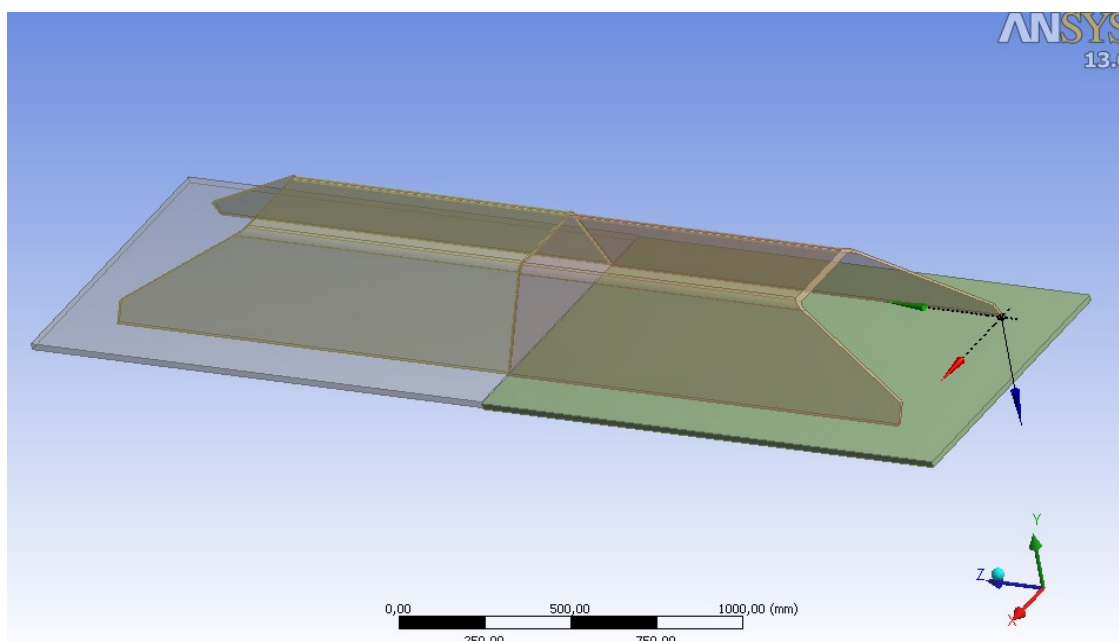
*Obr. 5.2.2.1 Tvorba geometrií nastavením parametrů*

Model byl nejdříve namodelován z poloviny složený z podstavné desky a uzavřené příruby (Obr. 5.2.2.2).



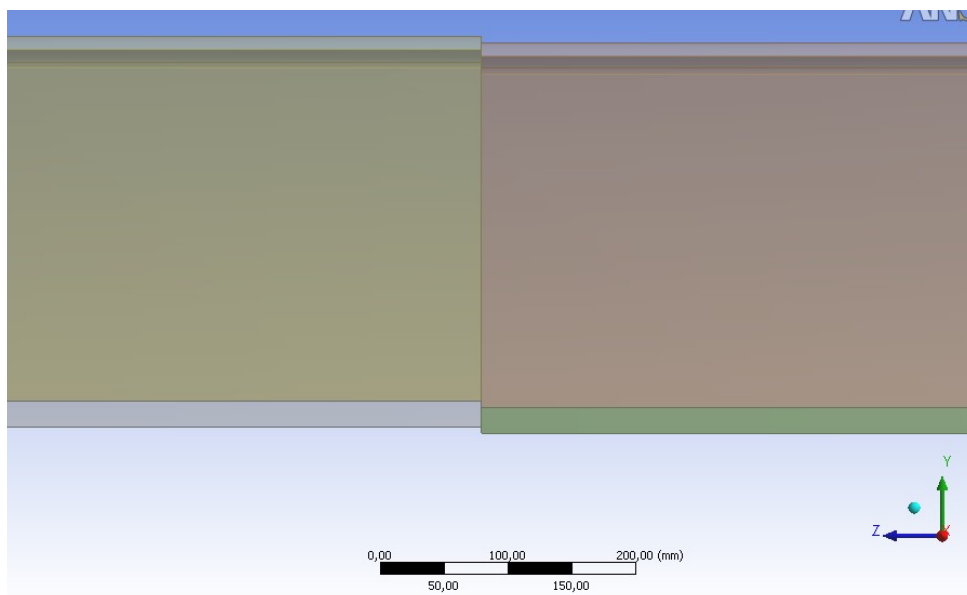
**Obr. 5.2.2.2** Polovina modelu vytvořená podle zadaných rozměrů

Poté byla tato geometrie díky osové symetrii zrcadlena a tím se získal celý model (Obr. 5.2.2.3).



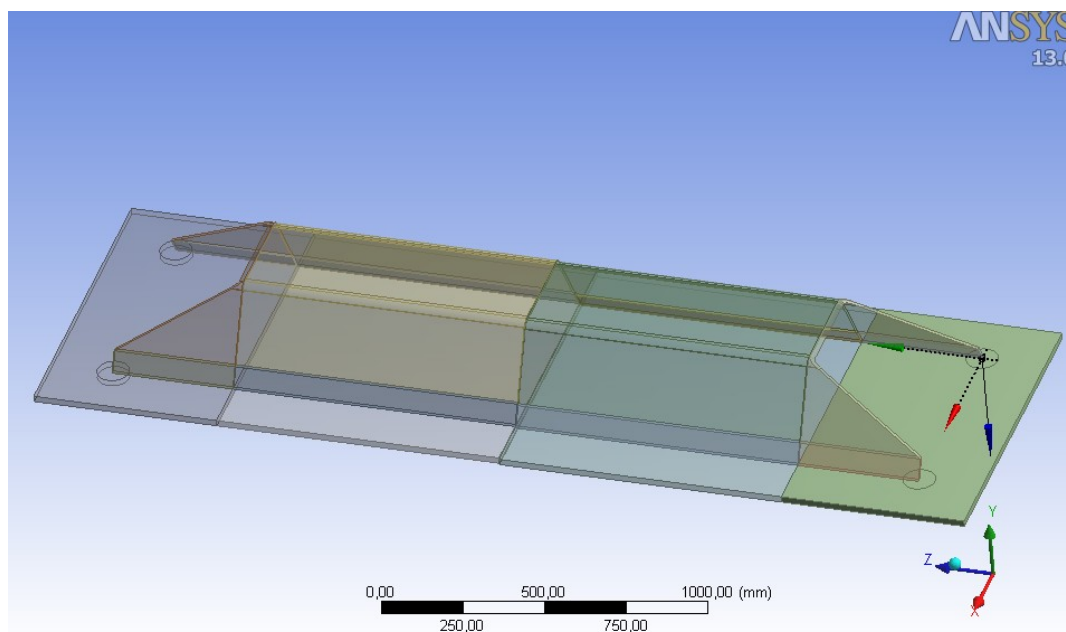
**Obr. 5.2.2.3** Celý model – 2 stejné poloviny profilu uprostřed svařené

Díky funkci posunutí potom mohly být poloviny modelu vůči sobě přesazeny. Tím byla simulována nepřesnost, která v praxi při jejich svařování může nastat (Obr. 5.2.2.4).



**Obr. 5.2.2.4** Přesazení uprostřed simulující nepřesné svaření profilu

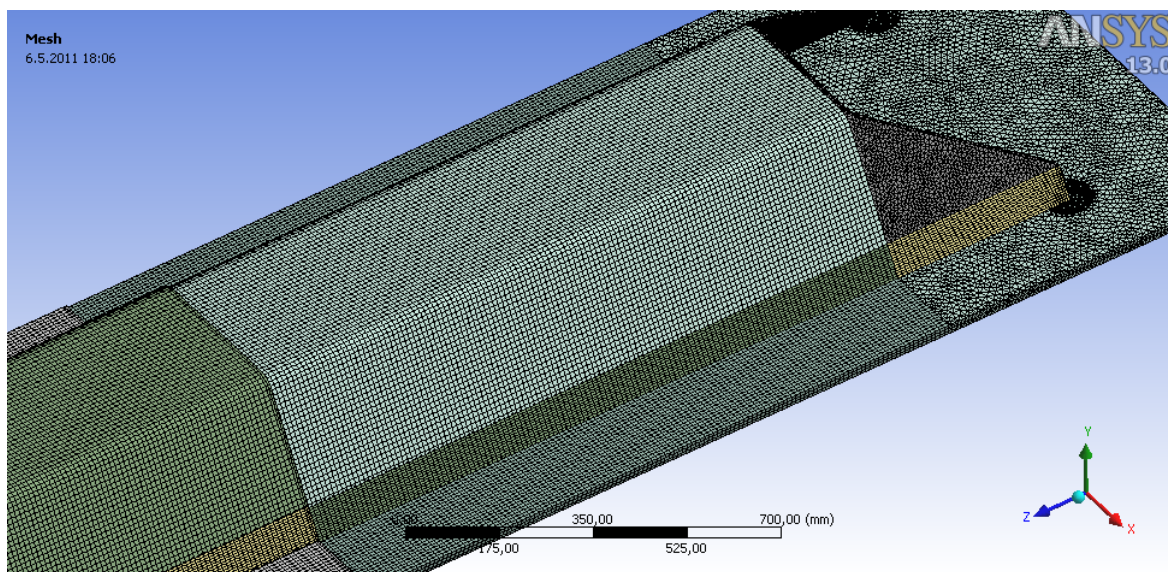
Tímto byl model prakticky totožný s profily, které vyrábí firma Huisman. Kvůli lepšímu síťování, zejména v kritických místech, byl však v modeláři ještě rozdělen na menší oblasti, ve kterých bude lepší kontrola nad hustotou a kvalitou sítě (Obr. 5.2.2.5).



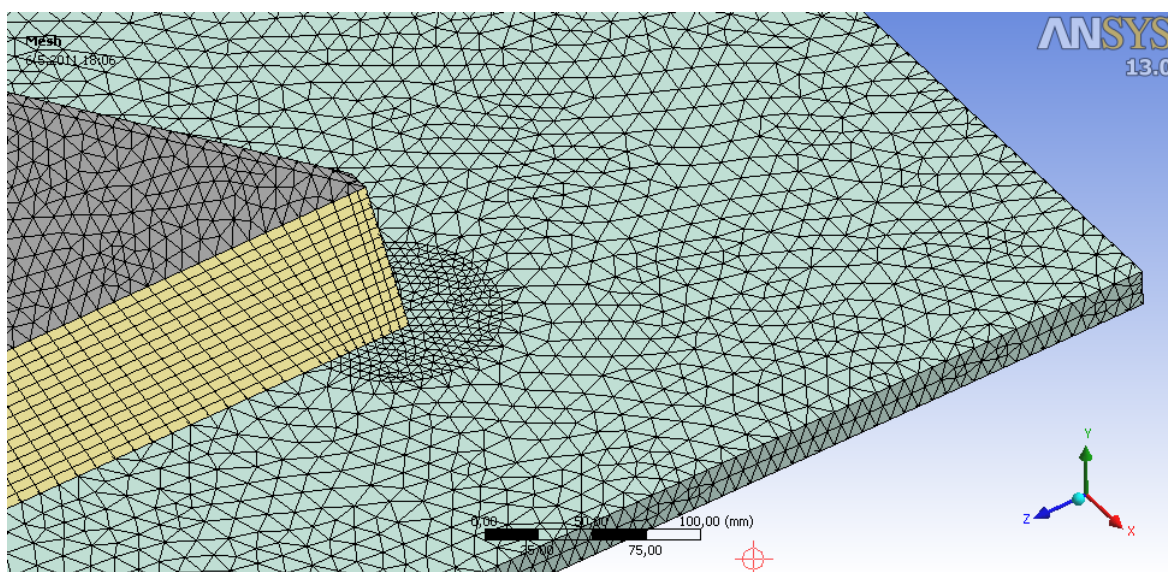
**Obr. 5.2.2.5** Finální model, na kterém budu vytvářet síť konečných prvků

### 5.2.3 Vytvoření sítě konečných prvků

Nejdříve se muselo rozhodnout, jaký typ elementů bude pro modelování tohoto profilu použit. Na výběr byly v podstatě prvky SHELL a nebo SOLID. U této úlohy a po konzultaci s vedoucím práce a dalšími znalými bylo rozhodnuto zvolit prvky SOLID, které dokáží lépe odrazit skutečný účinek vrubu. U SHELL prvků bývá ve vrubech problém s průměrováním.



*Obr. 5.2.3.1 Sít' konečných prvků na modelu*



*Obr. 5.2.3.2 Detail na vrub, kde předpokládám maximální napětí*

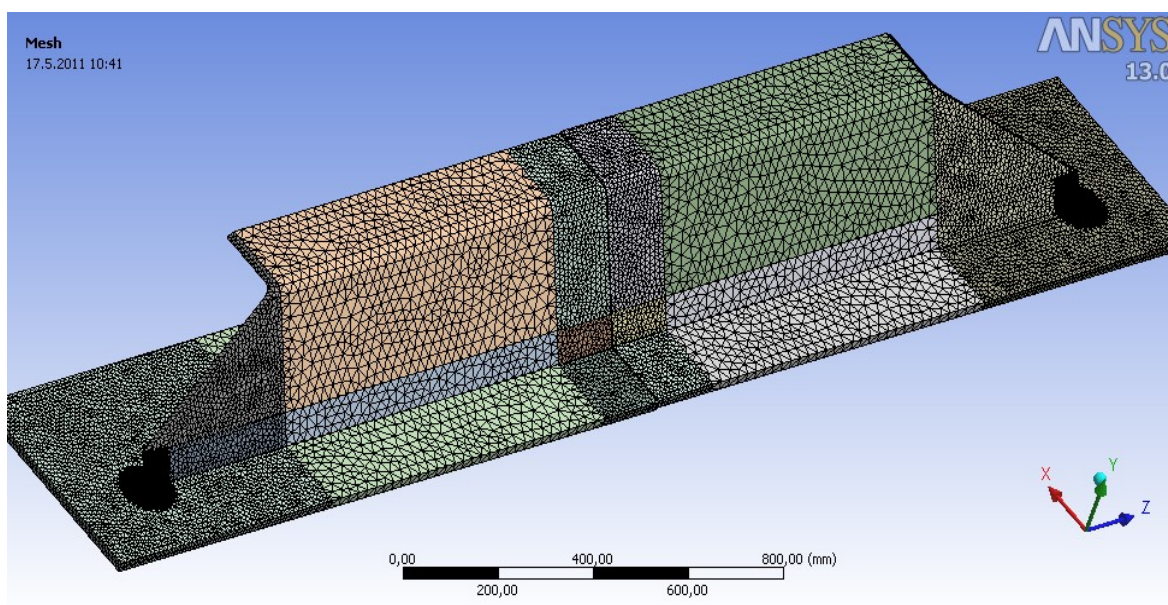


U tohoto modelu bylo velmi obtížné dosáhnout Brick-prvků (tedy 6-ti stěnů) v celém modelu (kvůli šikmým žebřím, přesazení uprostřed, atd...), natož potom s nimi ještě zhustit síť v potřebných místech. Proto byly voleny prvky čtyřstěny v místě vrubu, tedy místě s předpokladem maximálního napětí, v kombinaci s bricky ve zbytku modelu.

Na první pohled je vidět, že ve vrubu byla zachována ostrá hrana. Tím je dáno, že vypočtené napětí by rostlo tak, jak by se kolem vrubu zjemňovala síť a výsledné maximální napětí by bylo jen bezcenné číslo. Bylo rozhodnuto klást velký důraz na to, aby ve všech modelech byla síť stejná, hlavně v místě vrubu. Vyšlé maximální napětí bylo poté porovnáváno samostatně pro všechny modely a tím zjištěno, jak se mění vzhledem k měnícím se parametrům.

Pro zajištění požadované hustoty sítě tam, kde to je žádané a menší hustoty v místech, které nejsou podstatné, byly použity funkce Sizing a Refinement. Výsledná velikost sítě je pro největší 4 metry dlouhý model 1070969 uzlů a 286362 elementů.

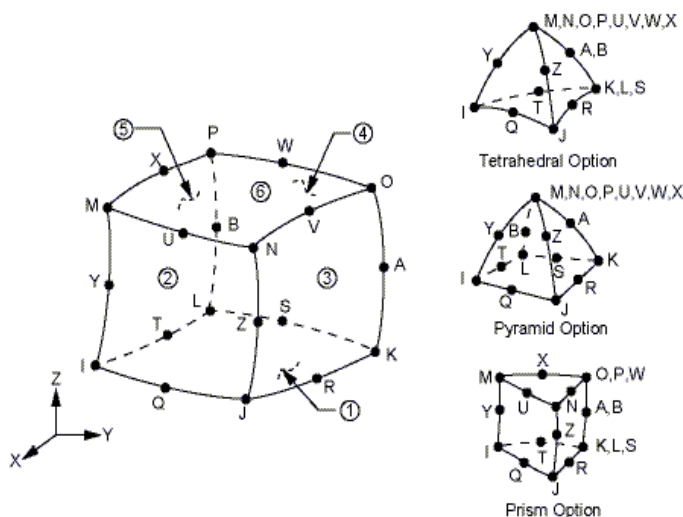
U tohoto modelu mohlo být využito jeho symetrie a bez ovlivnění výsledků počítat s polovičním modelem (Obr. 5.2.3.3). Ten byl také vytvořen a použit při prvních výpočtech, ale na přání zadavatele jsou finální výpočty provedeny na celém modelu.



**Obr. 5.2.3.3** Poloviční model s vytvořenou sítí konečných prvků

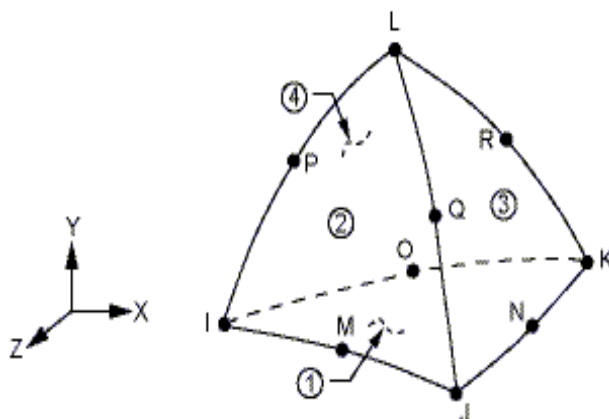
### 5.2.3.1 Volené typy elementů

SOLID95 (Obr. 5.2.3.1.1) [3] - může vzít v potaz i nepravidelné tvary bez větších ztrát přesnosti u výsledků. Tento prvek má kompatibilní posuv tvarů a je velmi vhodný k modelování zakřivených hranic, je definován dvaceti uzly mající tři stupně volnosti na každý uzel: posuv ve směrech  $x$ ,  $y$  a  $z$ . Prvek může mít jakoukoliv prostorovou orientaci.



**Obr. 5.2.3.1.1** Element SOLID95 [3]

SOLID92 (Obr. 5.2.3.1.2) [3] – Jednodušší prvek a zároveň jeden z nejstarších 3D prvků je čtyřstěn. Prvek je definován 10 uzly majícími tři stupně volnosti – posuvy v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Prvek může mít jakoukoliv prostorovou orientaci.



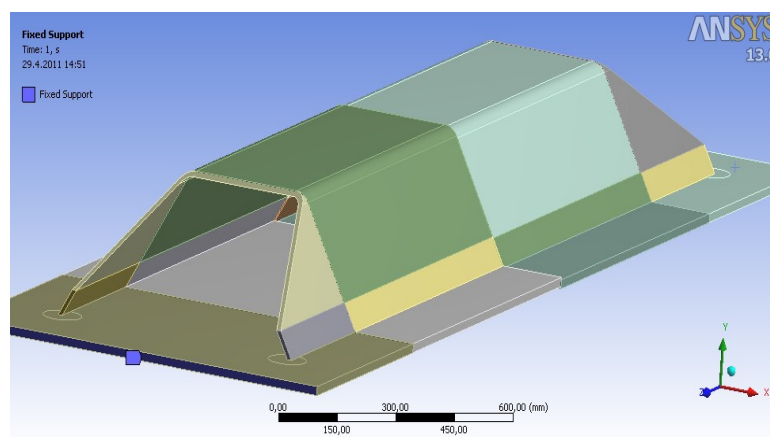
**Obr. 5.2.3.1.2** Element SOLID92 [3]

## 5.2.4 Zadání okrajových podmínek

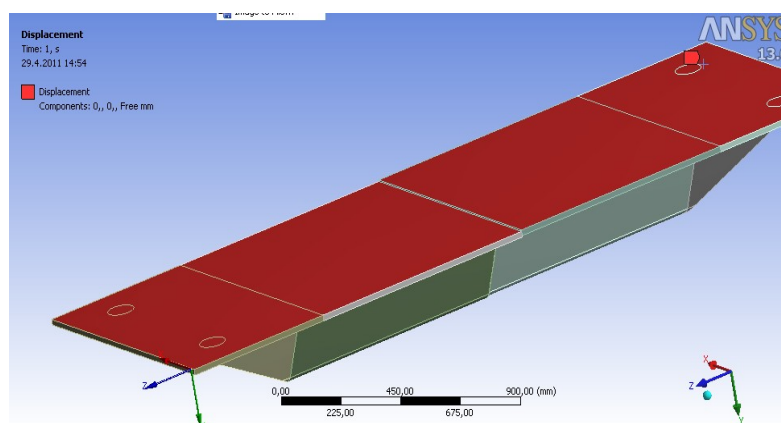
Okrajové podmínky musí co nejvíce simulovat skutečné zatížení, kterému bude tento profil v praxi vystaven. V praxi je tento profil namáhán prostým tahem. Na přání zadavatele byly použity dva druhy okrajových podmínek, a to:

A)

Na levé straně modelu byly odebrány 3 stupně volnosti v osách x,y,z (Obr. 5.2.4.1). Na spodní desku je pak zadána druhá okrajová podmínka, zamezení posuvu v osách x a y - povoleno pouze natahování profilu v ose z (Obr. 5.2.4.2).



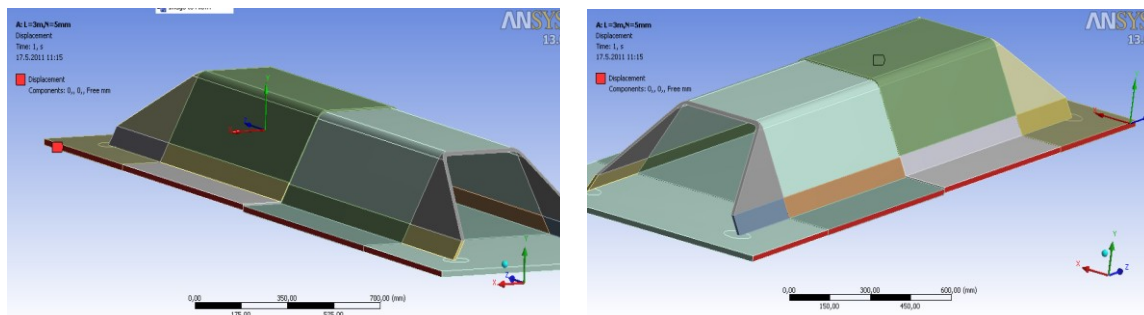
*Obr. 5.2.4.1 Vetknutí na levé straně modelu*



*Obr. 5.2.4.2 2. okrajová podmínka – na spodní desku*

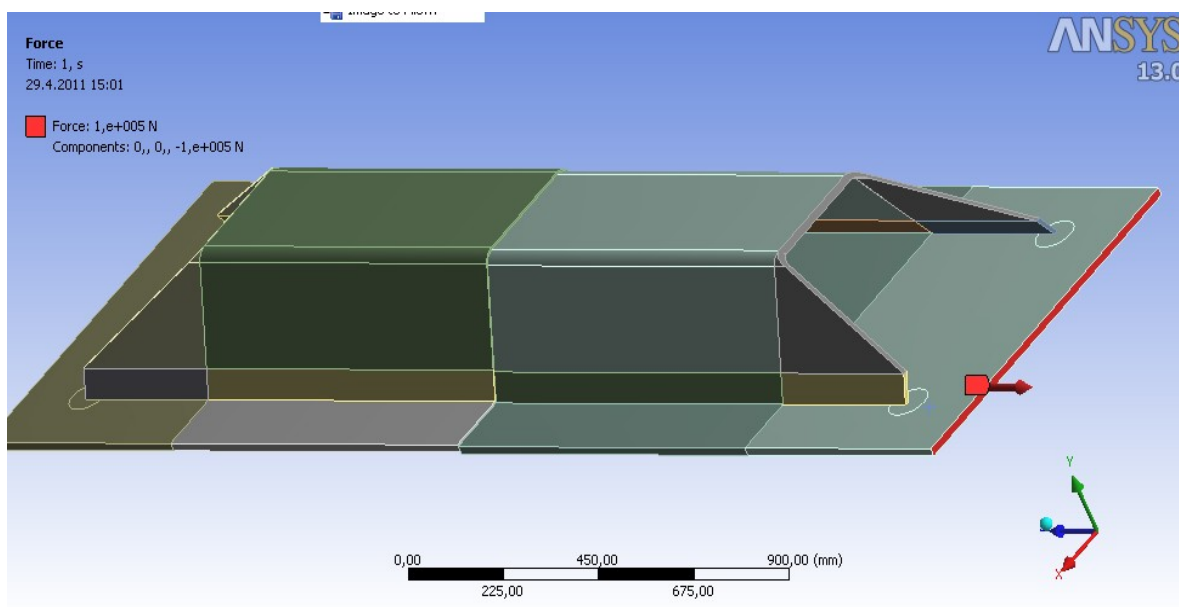
B)

Na levé straně modelu byly odebrány 3 stupně volnosti v osách  $x, y, z$  (Obr. 5.2.4.1). Na boční hrany spodní desky byla pak zadána druhá okrajová podmínka, zamezení posuvu v osách  $x$  a  $y$  - povoleno pouze natahování profilu v ose  $z$  (Obr. 5.2.4.3).



**Obr. 5.2.4.3** 2. okrajová podmínka – na boční hrany spodní desky

Nakonec byla zvolena síla. Jelikož se jedná o lineárně statickou úlohu a nejde v ní přímo o velikost vzniklého napětí, ale o jeho změnu v závislosti na zkoumaných parametrech, může být volena libovolně. Proto bylo dáno zatížení profilu silou 100 000 N na plochu na opačné straně od vetknutí (Obr. 5.2.4.4) působící v ose  $z$  tahové namáhání.



**Obr. 5.2.4.4** Zadání síly na pravou stranu modelu

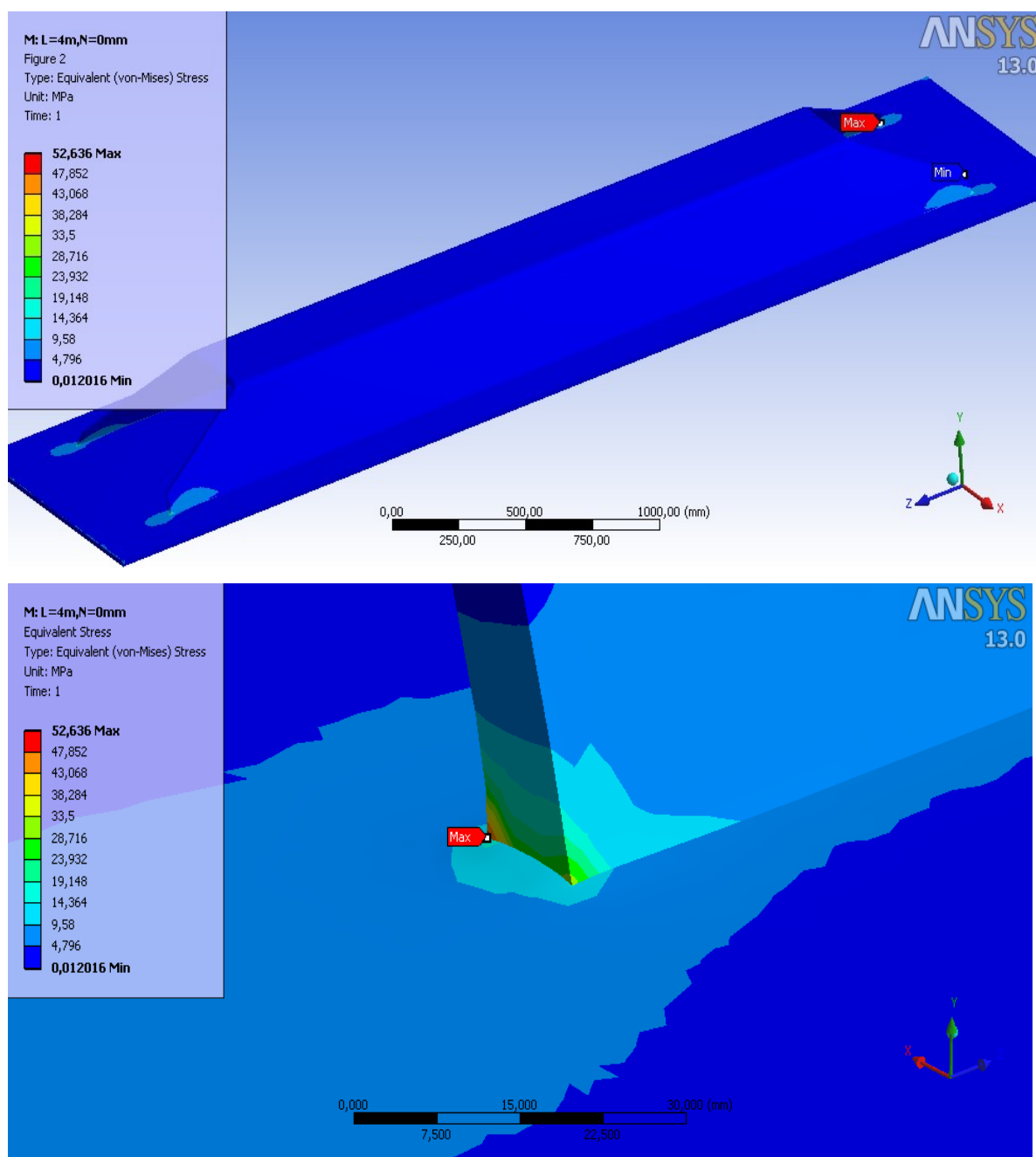


## 6 Výpočet a výsledky

Rozměry byly brány z katalogu firmy Huisman. Pro velkou rozsáhlost výsledků byla vybrána jenom varianta s délkou 4 metry. Zbývající výsledky jsou uvedeny v tabulkách. Všechny výpočty byly prováděny podle hypotézy HMM (Von Mises).

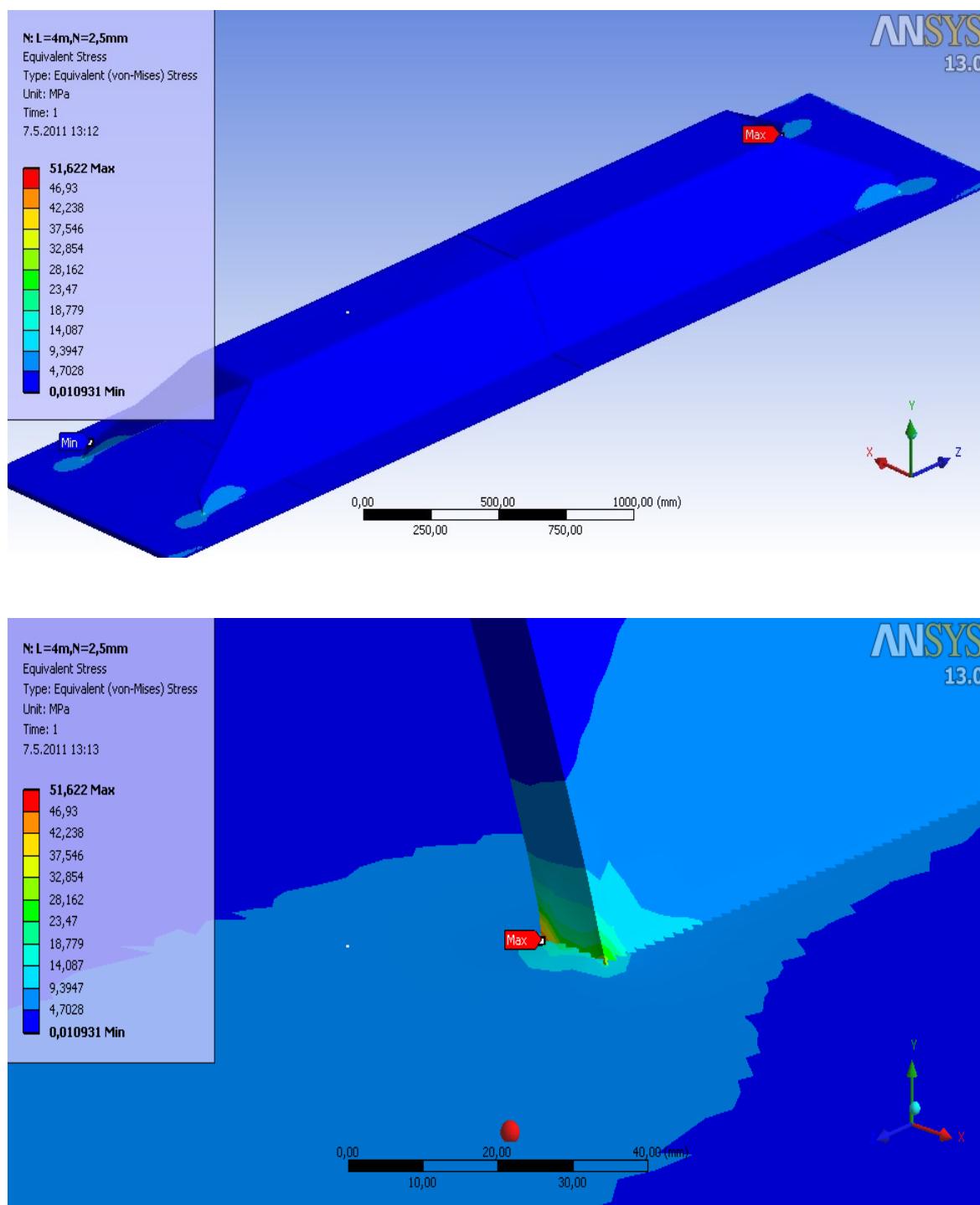
### 6.1 Výpočet pro okrajové podmínky A

a) Výrobní nepřesnost 0 mm



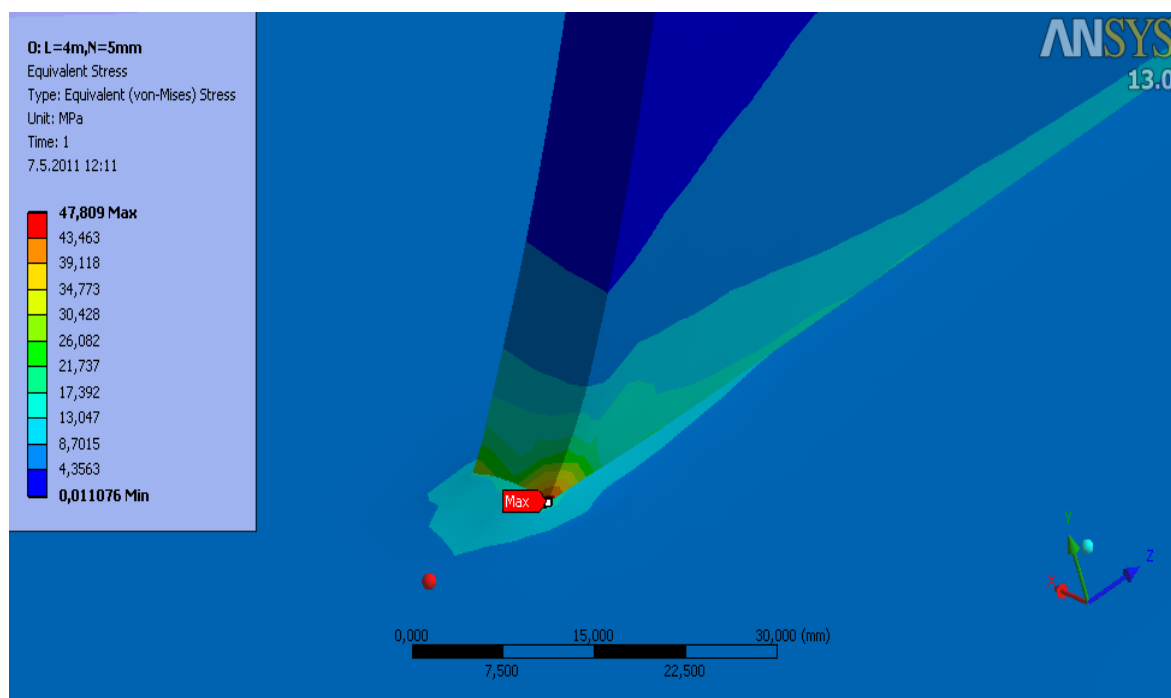
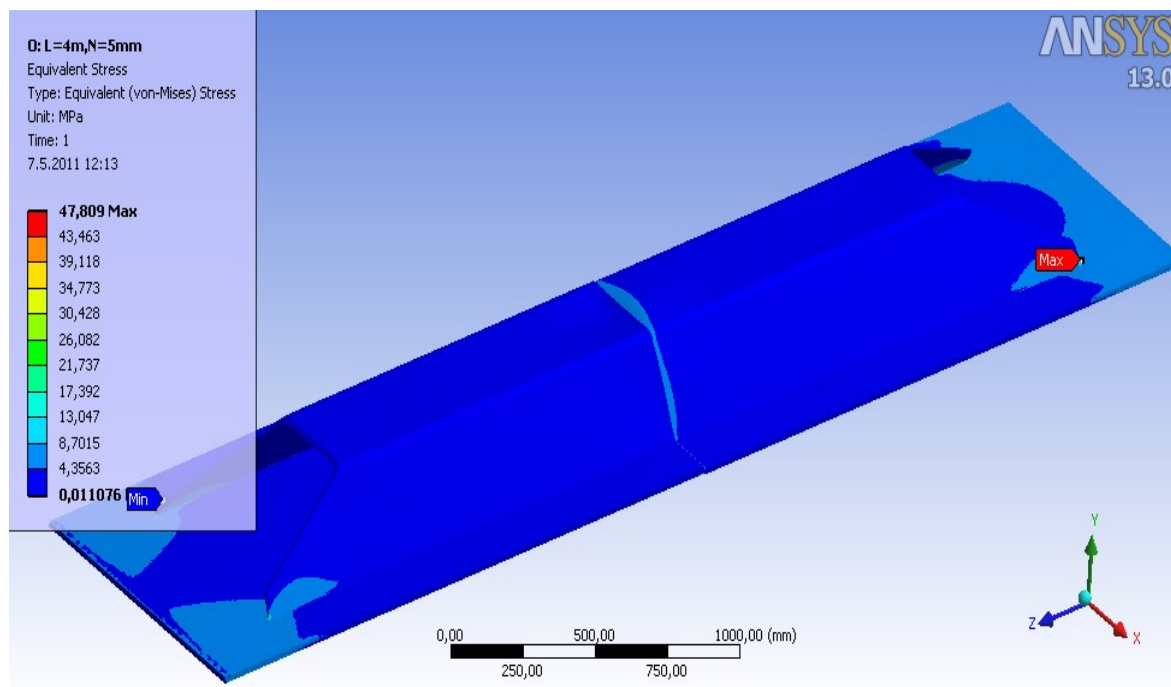
*Obr. 6.1.1 Napětí v celé součásti a detail na místo s maximálním napětím*

b) Výrobní nepřesnost 2,5 mm



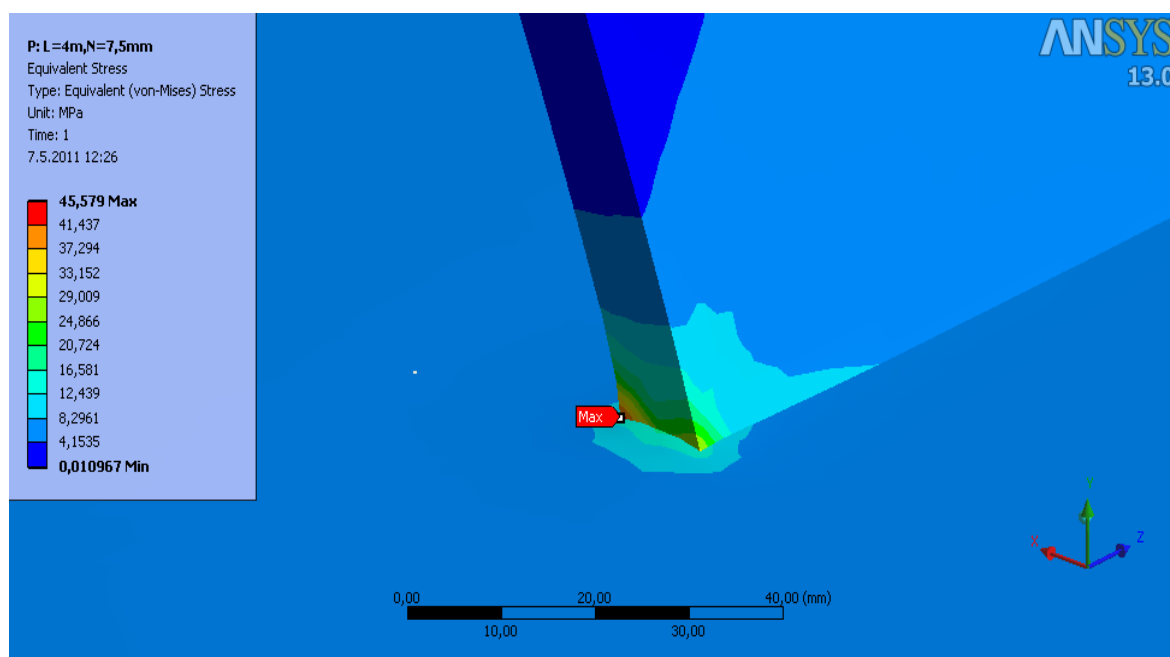
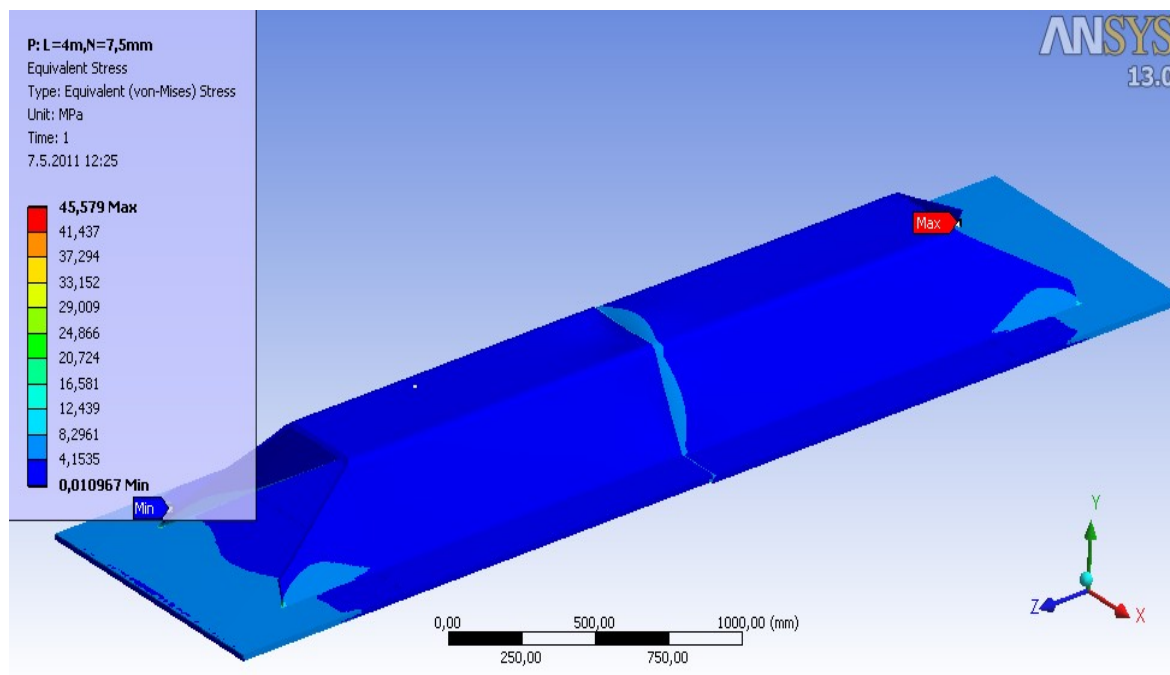
**Obr. 6.1.2** Napětí v celé součásti a detail na místo s maximálním napětím

c) Výrobní nepřesnost 5 mm



**Obr. 6.1.3** *Napětí v celé součásti a detail na místo s maximálním napětím*

d) Výrobní nepřesnost 7,5 mm



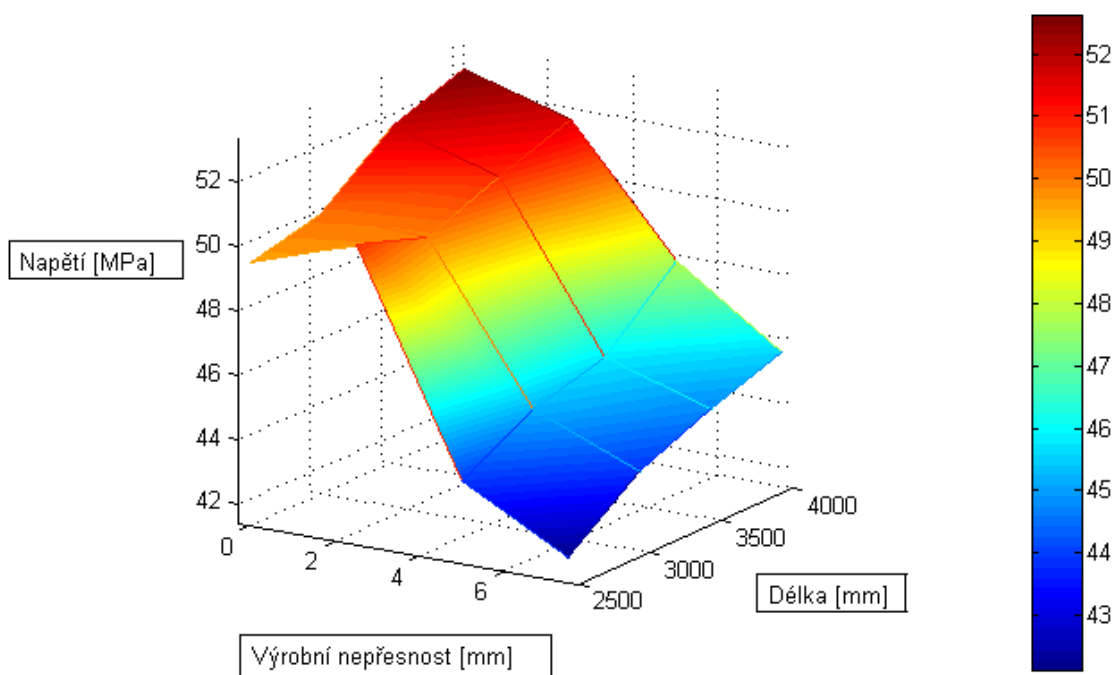
**Obr. 6.1.4** Napětí v celé součásti a detail na místo s maximálním napětím

## 6.1.1 Vypočtené maximální hodnoty napětí ve vrubu

Hodnoty max. napětí pro všechny kombinace (MPa)

|              | Výrobní nepřesnost N (mm) |        |        |        |
|--------------|---------------------------|--------|--------|--------|
| Délka L (mm) | 0                         | 2,5    | 5      | 7,5    |
| 2500         | 49,569                    | 50,723 | 43,927 | 42,124 |
| 3000         | 50,099                    | 49,938 | 45,199 | 43,845 |
| 3500         | 51,799                    | 50,824 | 45,799 | 44,77  |
| 4000         | 52,636                    | 51,622 | 47,809 | 45,579 |

**Tab. 6.1.1.1** Tabulka vypočtených hodnot napětí ve vrubu

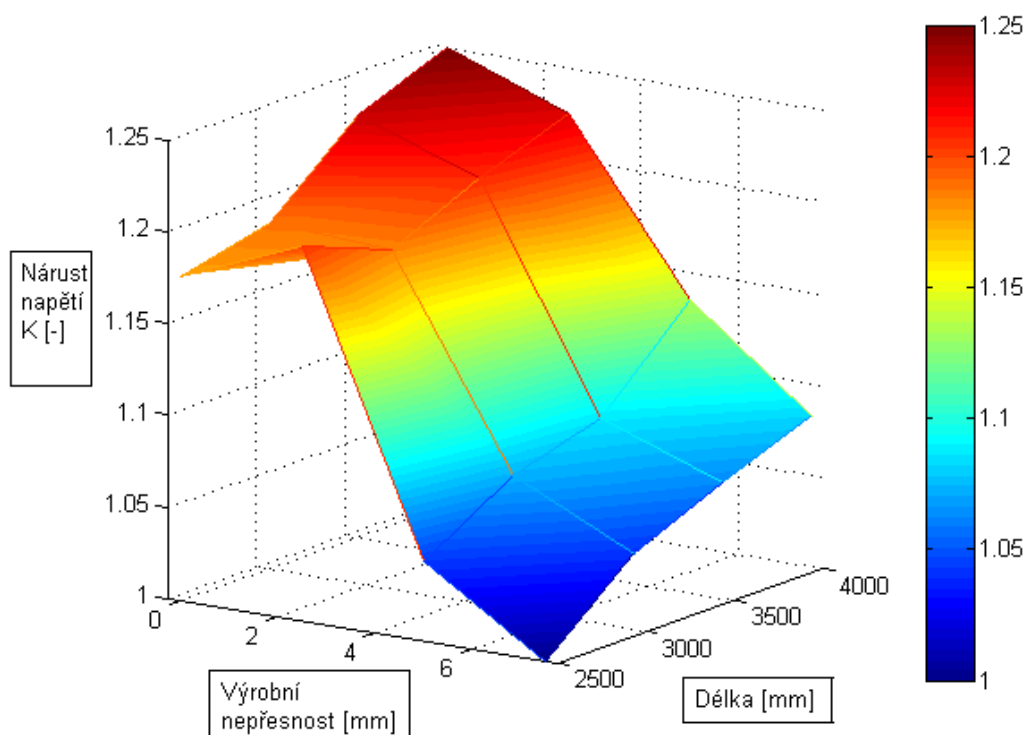


**Obr. 6.1.1.2** Graf koncentrace napětí ve vrubu v závislosti na délce a výrobní nepřesnosti

Pro lepší a rychlejší orientaci ve výsledcích a možnost rychle vidět jak a kolikrát daná kombinace ovlivní napětí ve vrubu byly výsledky interpretovány taky jako koeficient  $K$ , který se rovná 1 pro nejpříznivější kombinaci a narůstá.

|              | Výrobní nepřesnost N (mm) |       |       |       |
|--------------|---------------------------|-------|-------|-------|
| Délka L (mm) | 0                         | 2,5   | 5     | 7,5   |
| 2500         | 1,177                     | 1,204 | 1,043 | 1     |
| 3000         | 1,189                     | 1,185 | 1,073 | 1,041 |
| 3500         | 1,23                      | 1,207 | 1,087 | 1,063 |
| 4000         | 1,25                      | 1,225 | 1,135 | 1,082 |

**Tab. 6.1.1.3** Tabulka vypočtených hodnot napětí ve vrubu



**Obr. 6.1.1.4** Graf velikosti koeficientu nárustu napětí ve vrubu pro různé parametry

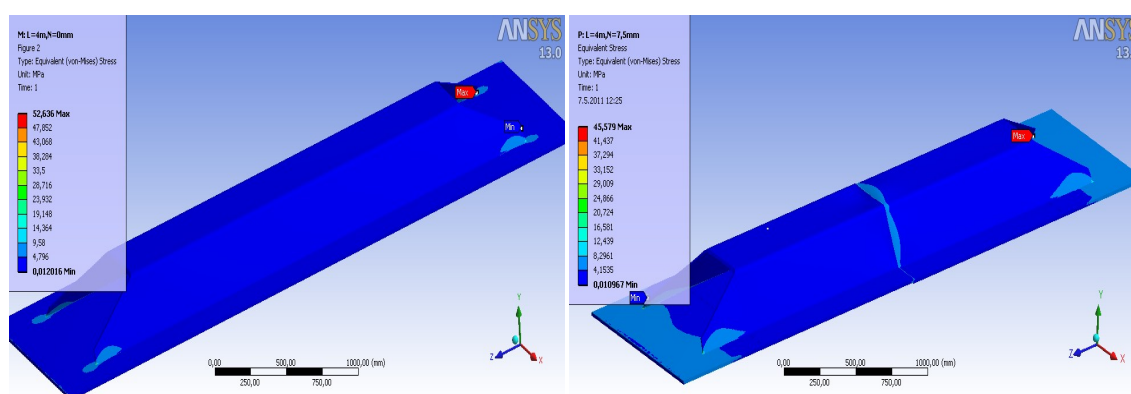
## 6.1.2 Komplexní hodnocení výsledků

Z výsledků je patrné, že maximální napětí, které se koncentruje ve vrubu je největší pro parametry: délka  $L = 4000$  mm a výrobní nepřesnost  $N = 0$  mm a tím se ukazuje toto rozložení jako nejméně příznivé. Nejmenší napětí je naopak pro délku  $L = 2500$  mm a výrobní nepřesnost  $N = 7,5$  mm. Největší vzniklé napětí je 1,25 krát větší než nejmenší.

### Hodnocení vlivu jednotlivých parametrů

**Délka** – Napětí v součásti se mírně zvyšovalo se vzrůstající délkou. Vliv délky je tedy nepopíratelný, zároveň však není nijak zásadní a výrazný.

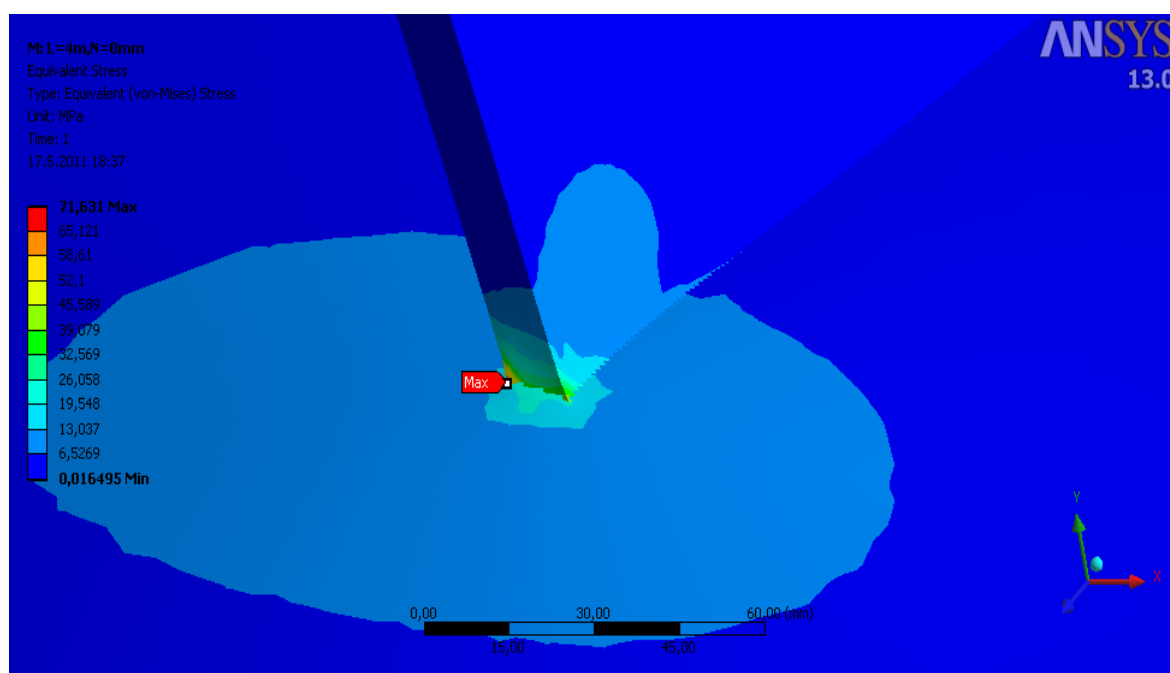
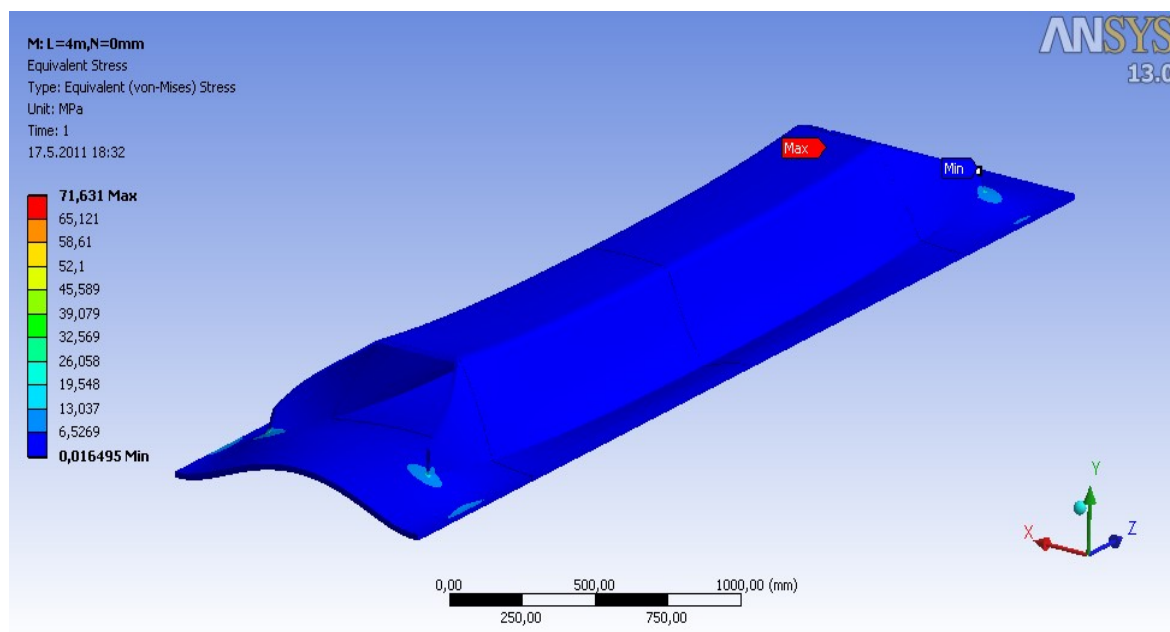
**Výrobní nepřesnost** - Maximální napětí v součásti se naopak s nárůstem výrobní nepřesnosti snižuje a to výrazněji, než tomu bylo u vlivu délky. Zjištění, že maximální napětí v součásti je tím menší, čím je větší výrobní nepřesnost, která je v praxi nežádoucí, pro mě bylo překvapivé. Při bližším náhledu na výsledky je ale patrné, že tento sledovaný parametr ovlivní nejen velikost maximálního napětí ve vrubu, ale hlavně celkové rozložení napětí v součásti. Díky přesazení uprostřed profilu dochází ke vzniku přídatného ohybového momentu, který má za následek vznik několika nových špiček napětí (Obr. 6.1.2.1). Tyto nově vzniklá místa s vyšší koncentrací napětí paradoxně snižují koncentraci napětí ve vrubu.



**Obr. 6.1.2.1** Změna rozložení napětí v součásti, vlevo součást s žádnou výrobní nepřesností a vpravo součást s výrobní nepřesností  $N=7,5$  mm

## 6.2 Výpočet pro okrajové podmínky B

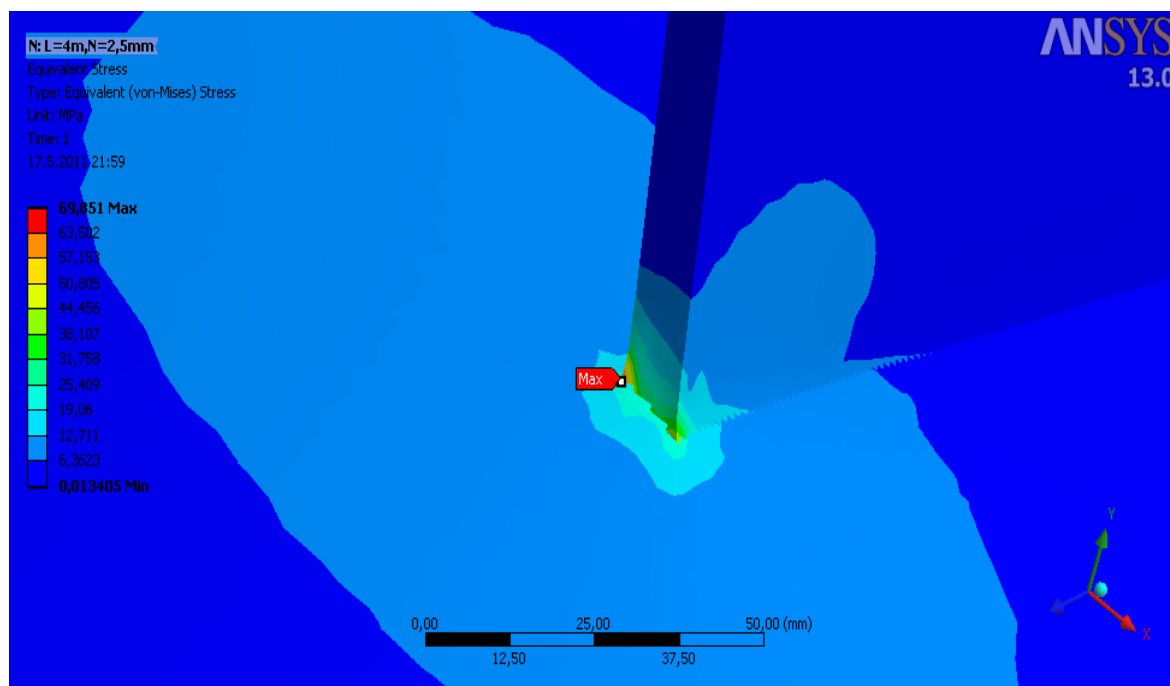
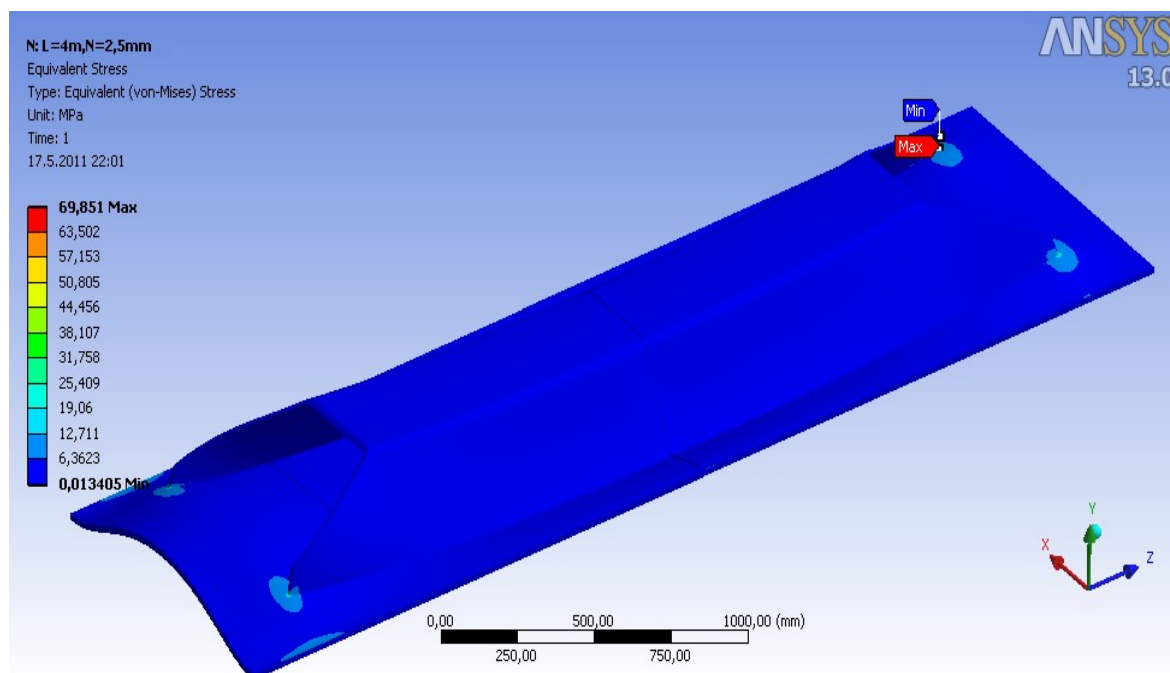
a) Výrobní nepřesnost  $N = 0$  mm



*Obr. 6.2.1 Napětí v celé součásti a detail na místo s maximálním napětím*

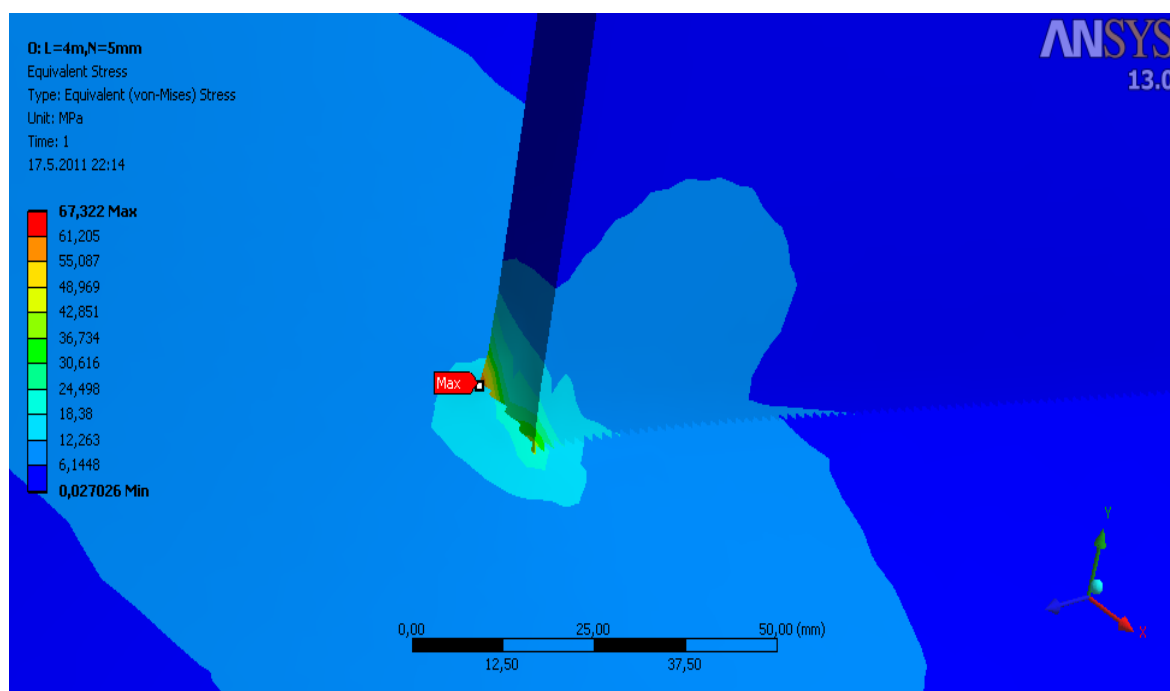
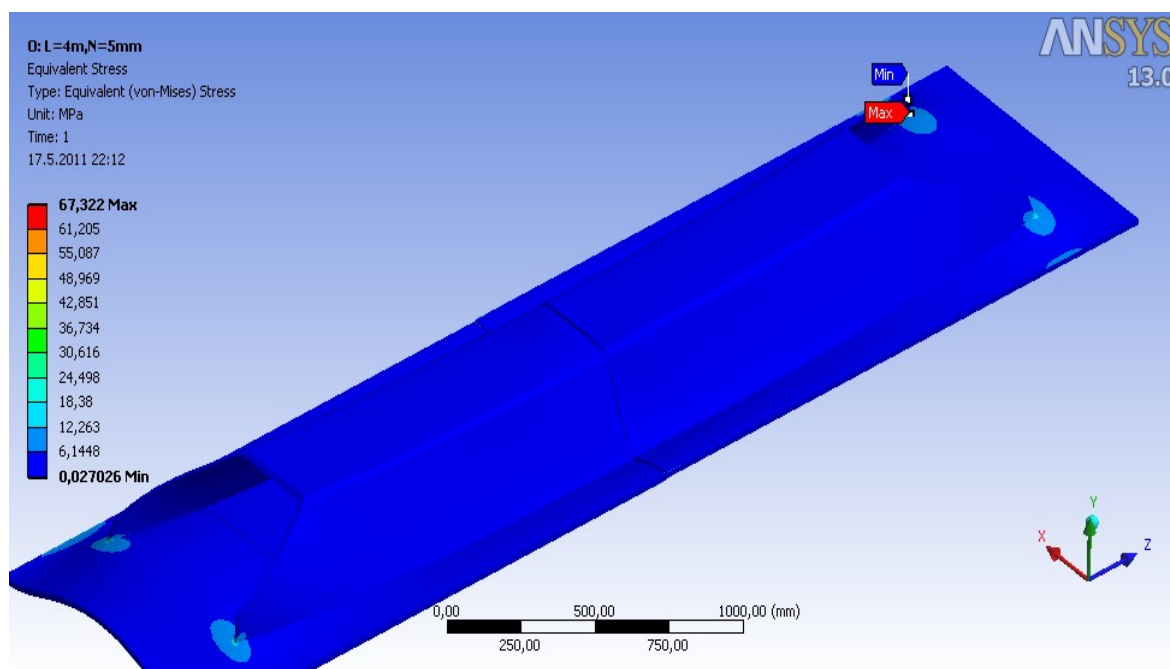


b) Výrobní nepřesnost N= 2,5 mm



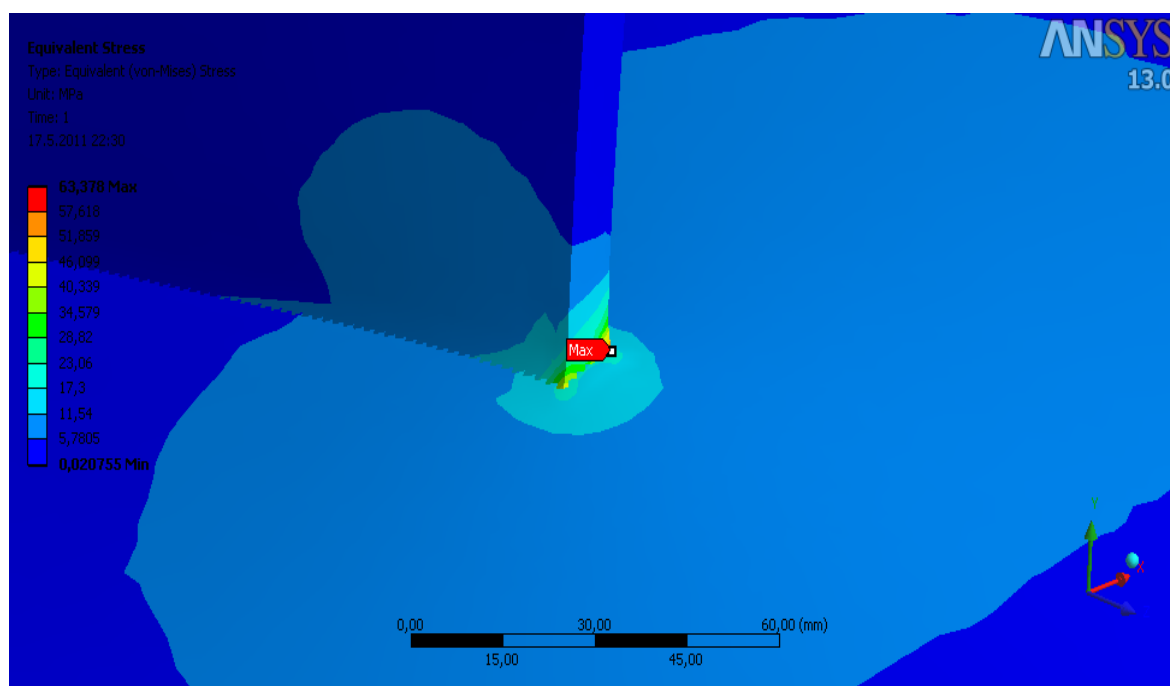
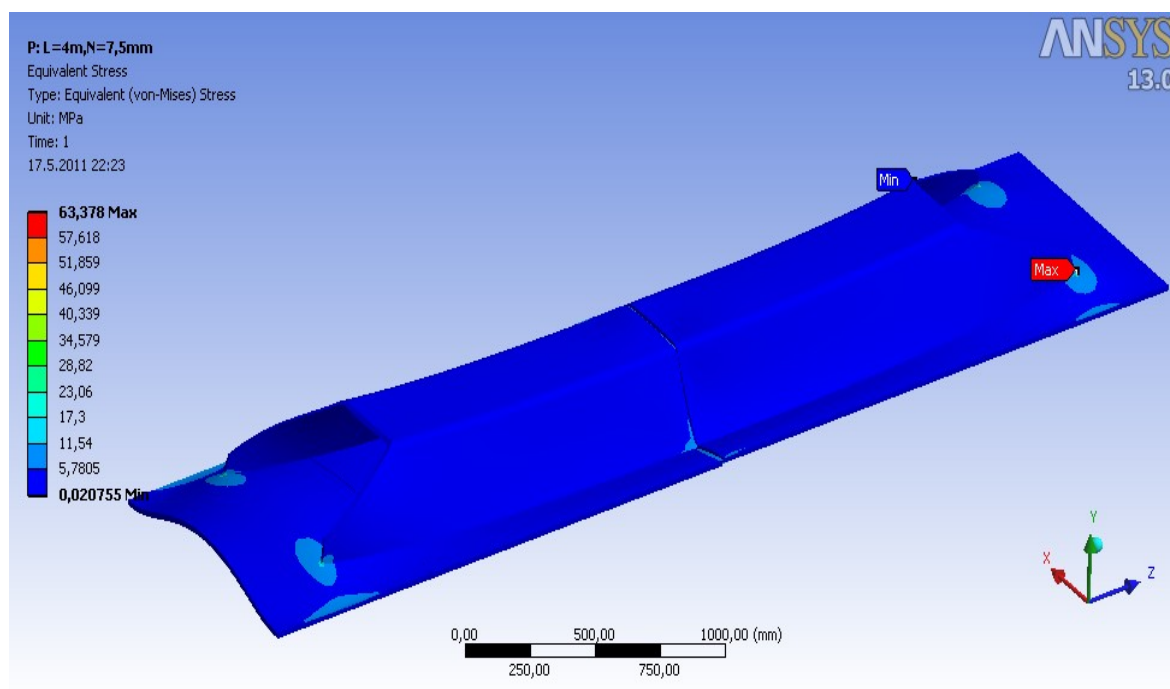
**Obr. 6.2.2** Napětí v celé součásti a detail na místo s maximálním napětím

c) Výrobní nepřesnost N= 5 mm



*Obr. 6.2.3 Napětí v celé součásti a detail na místo s maximálním napětím*

d) Výrobní nepřesnost  $N = 7,5 \text{ mm}$



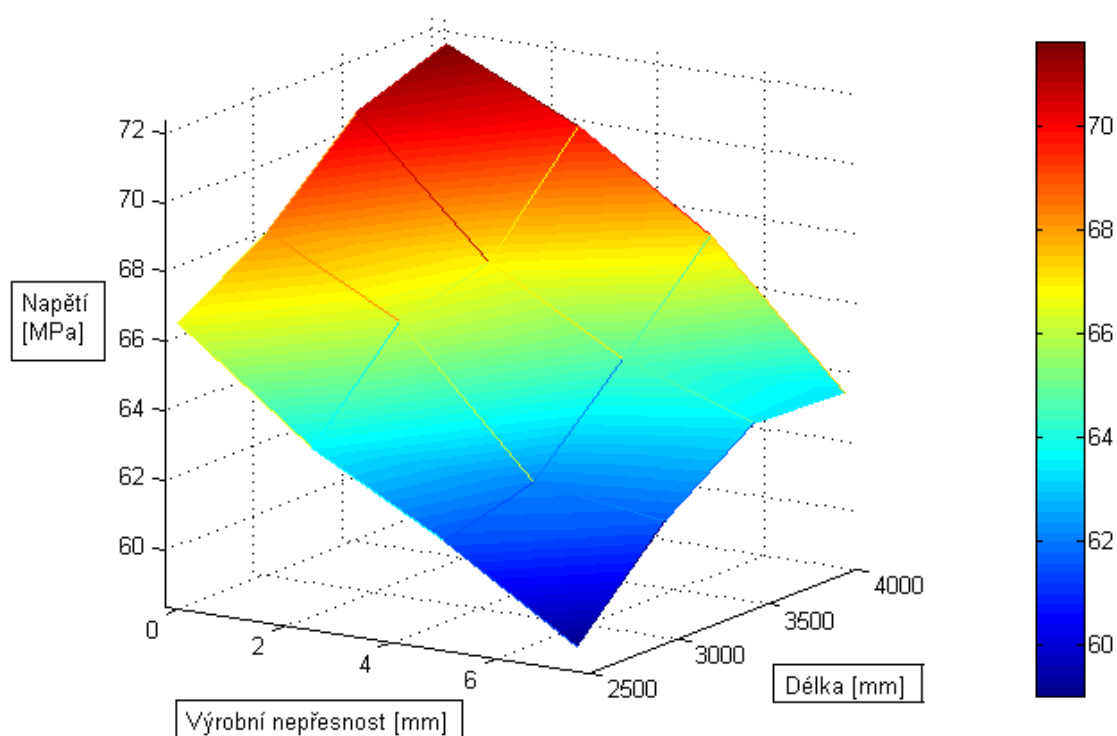
*Obr. 6.2.4 Napětí v celé součásti a detail na místo s maximálním napětím*

## 6.2.1 Vypočtené maximální hodnoty napětí ve vrubu

Hodnoty max. napětí pro všechny kombinace (MPa)

|              | Výrobní nepřesnost N (mm) |        |        |        |
|--------------|---------------------------|--------|--------|--------|
| Délka L (mm) | 0                         | 2,5    | 5      | 7,5    |
| 2500         | 66,612                    | 63,592 | 61,507 | 59,036 |
| 3000         | 68,241                    | 66,216 | 62,168 | 61,654 |
| 3500         | 70,66                     | 66,923 | 64,72  | 63,481 |
| 4000         | 71,631                    | 69,851 | 67,322 | 63,378 |

**Tab. 6.2.1.1** Tabulka vypočtených hodnot napětí ve vrubu

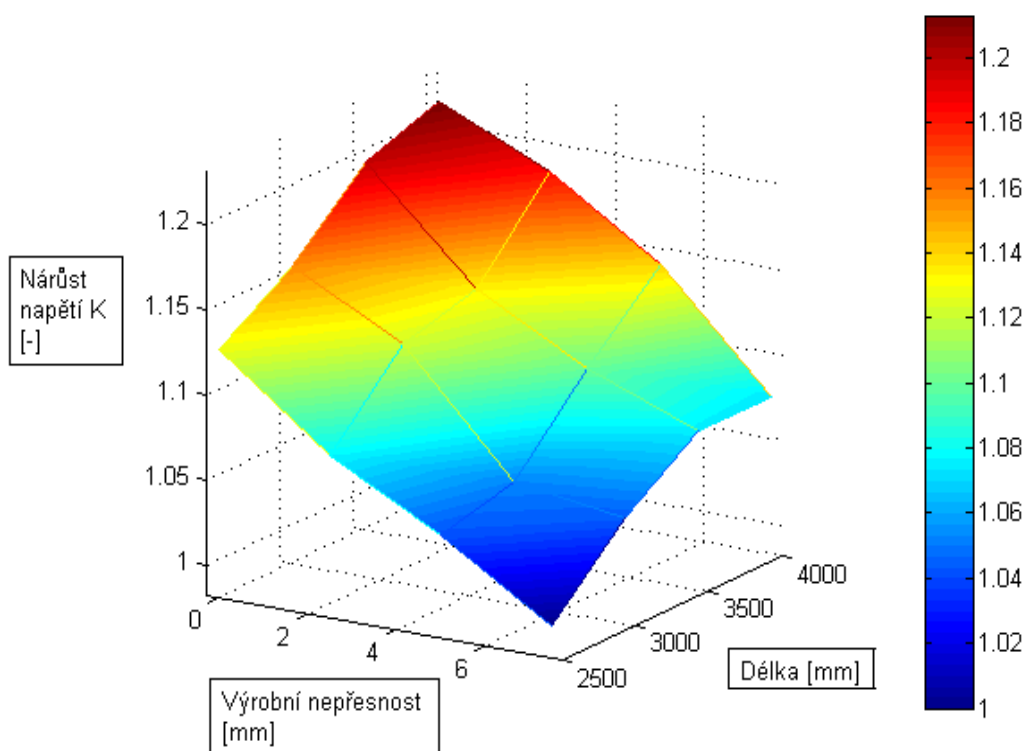


**Obr. 6.2.1.2** Graf koncentrace napětí ve vrubu v závislosti na délce a výrobní nepřesnosti

Pro lepší a rychlejší orientaci ve výsledcích a možnost rychle vidět jak a kolikrát daná kombinace ovlivní napětí ve vrubu byly výsledky interpretovány taky jako koeficient  $K$ , který se rovná 1 pro nejpříznivější kombinaci a narůstá.

|              | Výrobní nepřesnost N (mm) |          |          |          |
|--------------|---------------------------|----------|----------|----------|
| Délka L (mm) | 0                         | 2,5      | 5        | 7,5      |
| 2500         | 1,128328                  | 1,077173 | 1,041856 | 1        |
| 3000         | 1,155922                  | 1,121621 | 1,053052 | 1,044346 |
| 3500         | 1,196897                  | 1,133596 | 1,09628  | 1,075293 |
| 4000         | 1,213344                  | 1,183193 | 1,140355 | 1,073548 |

**Tab. 6.2.1.3** Tabulka vypočtených hodnot napětí ve vrubu



**Obr. 6.2.1.4** Graf velikosti koeficientu nárustu napětí ve vrubu pro různé parametry

## 6.2.2 Komplexní hodnocení výsledků

Z výsledků je patrné, že maximální napětí, které se koncentruje ve vrubu je největší pro parametry: délka  $L = 4000$  mm a výrobní nepřesnost  $N = 0$  mm a tím se ukazuje toto rozložení jako nejméně příznivé. Nejmenší napětí je naopak pro délku  $L = 2500$  mm a výrobní nepřesnost  $N = 7,5$  mm. Největší vzniklé napětí je 1,21 krát větší než nejmenší.

Tím jsou výsledky velmi podobné pro oba druhy okrajových podmínek. Při okrajových podmínkách B vzniká v součásti o něco vyšší napětí než u okrajových podmínek A. Součást se pro oba druhy okrajových podmínek rozdílně deformuje.

### Hodnocení vlivu jednotlivých parametrů

**Délka** – Napětí v součásti se mírně zvyšovalo se vzrůstající délkou. Vliv délky je tedy u obou typů okrajových podmínek přibližně stejný.

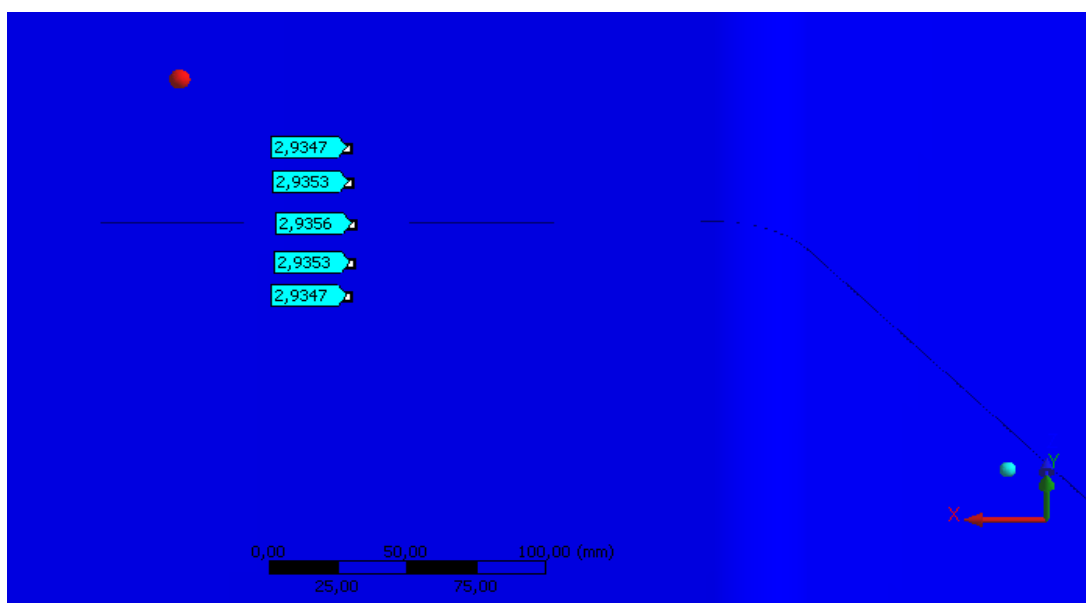
**Výrobní nepřesnost** – Napětí v součásti se naopak mírně snižovalo s tím jak se zvětšovala výrobní nepřesnost. U těchto okrajových podmínek však nedochází k výrazné změně rozložení napětí v celé součásti jako to bylo u okrajových podmínek A.

Při změně okrajových podmínek mají měněné parametry, tedy délka a výrobní nepřesnost přibližně stále stejný vliv na velikost maximálního napětí ve vrubu. Vlivem rozdílného způsobu deformace se však mění rozložení napětí v součásti. Většina problémů, se kterými se ve firmě Huisman potýkají a které jsou jim známy se projeví u obou typů okrajových podmínek, výrazněji pak u typu A.

### 6.3 Studie nárůstu napětí uprostřed součásti v závislosti na výrobní nepřesnosti

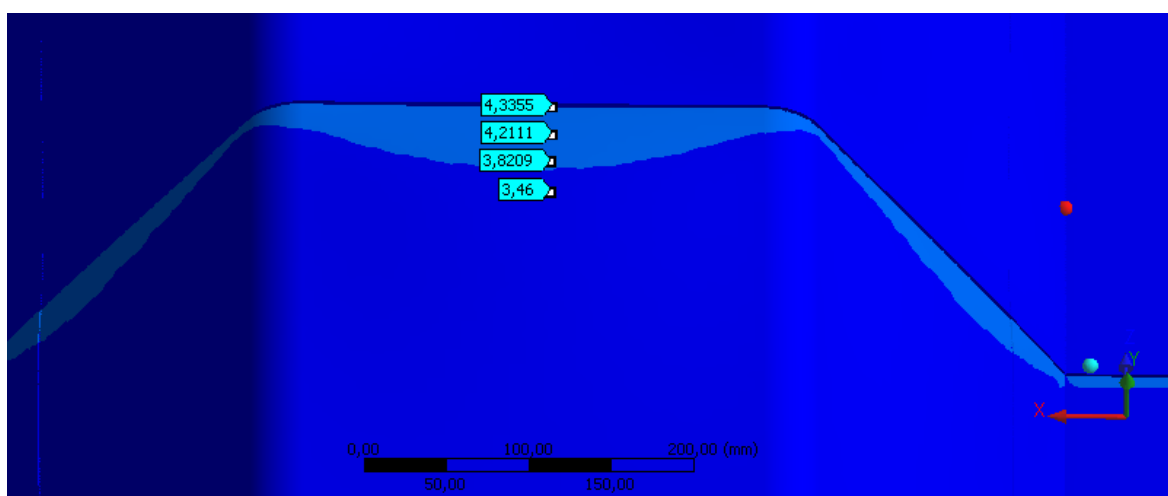
Pro délku  $L = 4$  m a při okrajových podmínkách A bylo zjištěno, jak se mění napětí v místě přesazení v závislosti na výrobní nepřesnosti. Toto napětí zde narůstá kvůli vzniku ohybového momentu uprostřed, protože součást se v reálu a i v modelu může deformovat pouze v jedné ose (TAH).

a) Pro  $N = 0$  mm



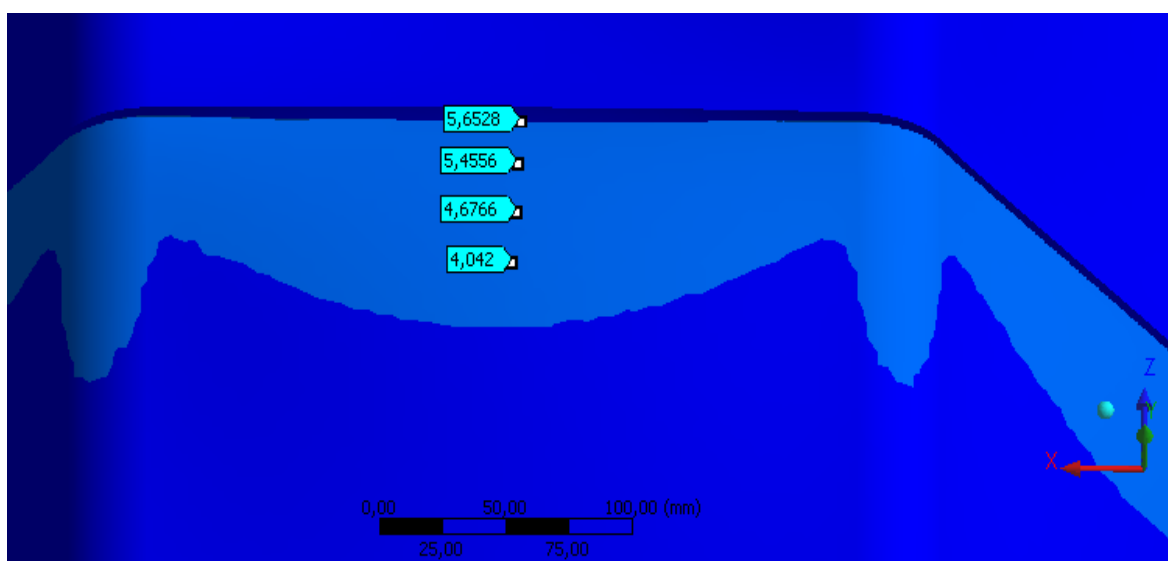
**Obr. 6.3.1** V případě nulové výrobní nepřesnosti působí uprostřed součásti čistý tah

b) Pro  $N = 2,5$  mm



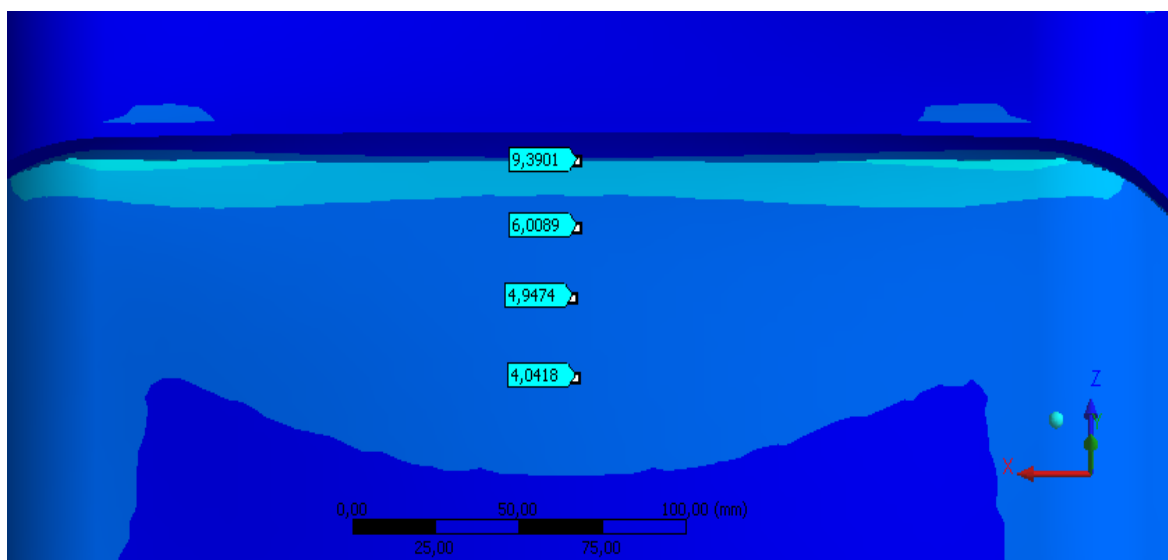
**Obr. 6.3.2** Při mírném přesazení se už začíná projevovat přídavný ohyb a vliv vrubu

c) Pro  $N = 5 \text{ mm}$



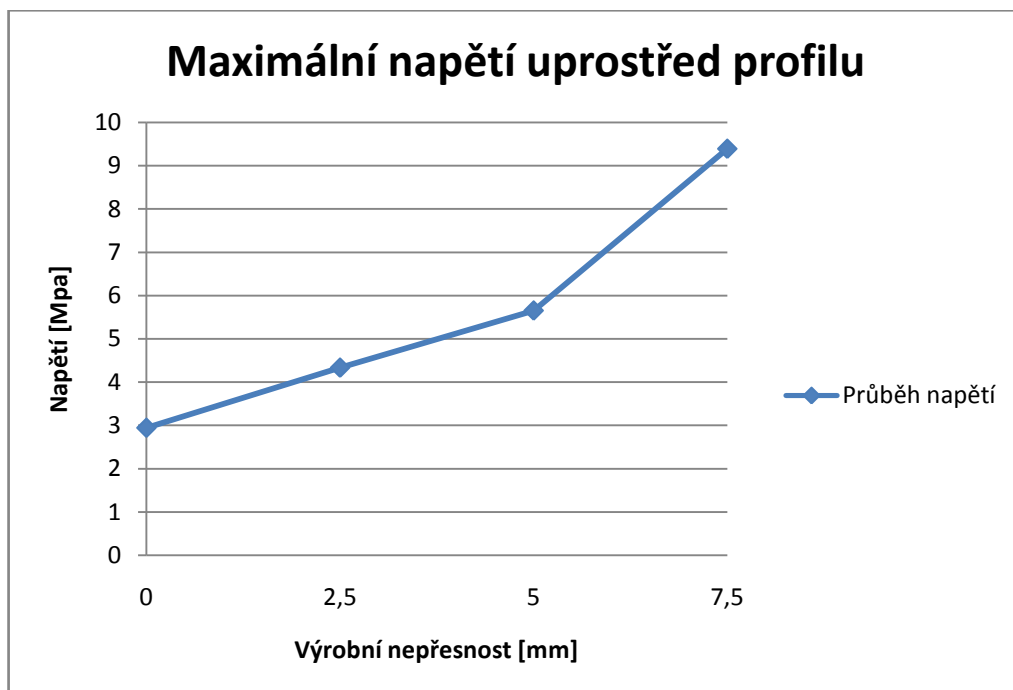
**Obr. 6.3.3** S nárůstem velikosti přesazení se zároveň stále zvětšuje napětí a také rozrůstá ovlivněná oblast

d) Pro  $N = 7,5 \text{ mm}$



**Obr. 6.3.4** Při maximální zkoumané hodnotě výrobní nepřesnosti 7,5 mm je vzrůst napětí a ovlivnění oblasti poměrně výrazné

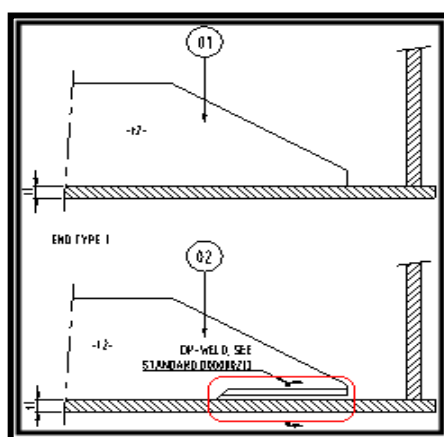




**Obr. 6.3.5** Graf znázorňující nárůst napětí uprostřed součásti vlivem výrobní nepřesnosti

## 6.4 Důvody pro výrobní postupy užívané firmou Huisman

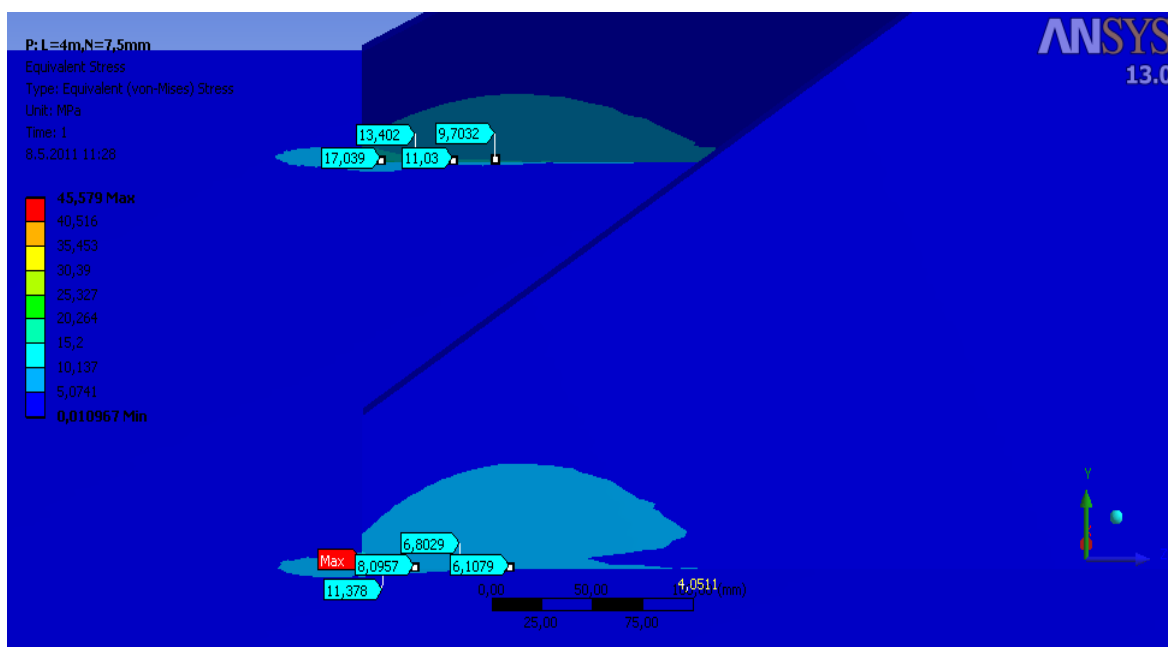
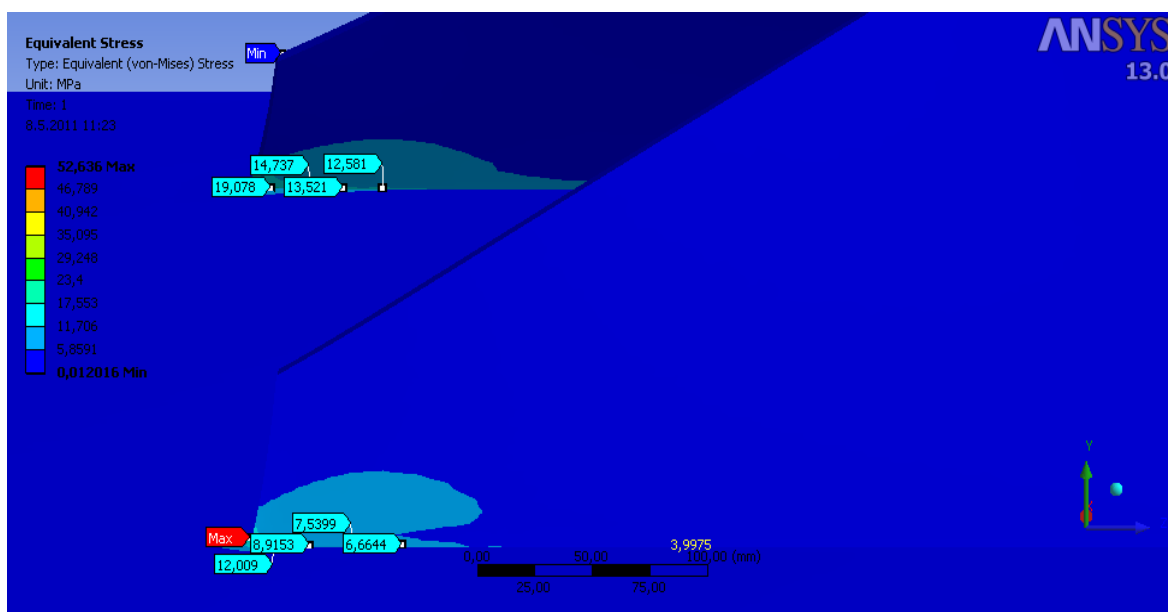
Jak již bylo zmíněno v bodě 2.2 (str. 11), firma Huisman při výrobě vyztužených profilů používá některé praxí prověřené postupy. Jedním z nich je sražení konce výztuhy pod určitým úhlem, jehož vliv je popsán a vysvětlen v bodě 1. Tím druhým je potom podřezání výztuhy blízko vrubu a za ním a vyvaření celého tohoto místa (Obr. 6.4.1).



**Obr. 6.4.1** Podřezání výztuhy na jejím konci před svařováním

Z výsledků napětí je patrné, že právě v této oblasti za vrubem se také koncentruje napětí a to vždy ať už je profil s výrobní nepřesností nebo bez ní. Proto se přichází s podříznutím výztuhy v tomto kritickém místě a jejího následného vyvaření. Tak se toto místo stane více odolné proti vzniklému napětí.

Pro představu uveden průběh napětí ve sledovaném místě.



**Obr. 6.4.2** Na horním obrázku je vidět průběh napětí ve zkoumaném místě při výrobní nepřesnosti 0 mm, dole při výrobní nepřesnosti 7,5 mm.

Z výsledků je patrné, že spodek výztuhy těsně u jejího konce v místě přivaření je namáhán více. Konkrétně u tohoto uzavřeného profilu je asi o 40% více namáhána výztuha z vnitřní strany v závislosti na úhlu  $\alpha$ .

V tomto případě opět výrobní nepřesnost nijak negativně neovlivní velikost vzniklého napětí. Čím větší výrobní nepřesnost, tím se hodnota napětí sníží, ale rozšíří se oblast ve které je napětí rozloženo.

## 7 Závěrečné zhodnocení

Byl popsán způsob využití výztuh u strojních součástí (bod 2, str. 11), vliv vrubů a výrobních nepřesností (bod 3, str. 14). Je tedy na místě říci, že je bez diskuze nutné dávat si u každé konstrukce veliký pozor především na vruby, ve kterých dochází k největší koncentraci napětí a to hlavně tam, kde může dojít k ohrožení lidského zdraví.

Podle materiálů poskytnutých firmou Huisman jsem v programu Workbench (ANSYS 13) vytvořil počítačový model výztuhy uzavřeného profilu (kanálová výztuha), která se používá v tělech jeřábů s předpokladem tahového zatížení. Tato výztuha je tvořena ze dvou stejných kusů, které jsou uprostřed svařeny. Primárním úkolem bylo posoudit, jaký vliv na rozložení napětí v této výztuze má nepřesné svaření těchto dvou kusů uprostřed a tím přesazení jednoho vůči druhému. Jako sekundární parametr, který se měnil, jsem zvolil délku celého profilu. Kombinováním těchto proměnných parametrů vzniklo 16 modelů a jejich výpočtem pak tabulka a graf, který ukazuje, jak tyto parametry ovlivňují rozložení napětí v profilu. Celý tento výpočet jsem provedl pro dva typy okrajových podmínek.

Z uvedených výsledků je patrné, že oba zkoumané parametry mají vliv na rozložení napětí v součásti, vliv délky však není příliš výrazný. Výrobní nepřesnost ovšem do profilu zavádí i přídavný ohybový moment, který má za následek pokles maximálního napětí ve vrubu, na druhou stranu však také vznik nové špičky napětí uprostřed v místě výrobní nepřesnosti a to především za okrajových podmínek A. Studie taky ukázala, že technické postupy používané firmou Huisman při výrobě těchto svařovaných profilů jsou na místě.

Rovněž byla vytvořena další tabulka a graf, ve kterých je změna napětí vyjádřena jako koeficient nárustu napětí, která slouží konstruktérovi jako pomůcka a rychlá informace o tom, jaké špičky napětí může očekávat a jak je co nejlépe dimenzovat.

## 8 Final Conclusion

We have described herein a method how to apply steel reinforcements with machine parts (pt. 2, page 11), influence of notches and manufacturing inaccuracies (pt. 3, page 14). Thus it is necessary to state as for each structure without any doubt, that we have to pay great attention especially to notches, in which a big strain concentration takes place, mainly in locations where human health might be endangered.

As per the documentation provided by Huisman company I have compiled in Workbench (ANSYS 13) program a computer model of the reinforcement for closed welded section reinforcement (a channel stiffener – U section), which is used in bodies of the cranes featured with expectations of a traction load. Said reinforcement has been established from two same pieces, welded in the center. Primary task was to consider, what is the influence of strain distribution with inaccurate welding of the above two pieces, and this way mutual overlapping of the two pieces. As a secondary parameter to be modified I selected the length of the entire section. Combining the two variable parameters resulted in establishing the 16 models, and calculating resulted in a table and graph, showing how these parameters affect the strain distribution within the welded section. The whole calculation has been made for two types of limit conditions.

From the above mentioned results ensue, that both tested parameters affect the strain within a part, however the impact of length is not considerable so much. However, the manufacturing inaccuracy implements into the welded section an additional bending moment, which results in decrease of a maximum strain in the notch, on the other hand, however, affects also establishment of a new strain peak at the center of the manufacturing inaccuracy, especially under limit conditions A. Study showed, that technical procedures as used with Huisman for manufacturing these welded sections are dully justified.

We have presented another table and graph, in which the strain differential is presented as the factor of strain growing, serving the designer as an aid and quick information on facts, what strain peaks may be expected and how to dimension it the best way.

## 9 Použitá literatura

- [1] KUČERA, JOSEF. Úvod do mechaniky lomu I., Vruby a trhliny, nestabilní lom při statickém zatížení. 1. vyd. Ostrava: VŠB - TU, 2002. 156 s. ISBN 80–7078-862–3.
- [2] KOLÁŘ, VLADIMÍR, NĚMEC, IVAN, KANICKÝ, VIKTOR. FEM principy a praxe metody konečných prvků. 1. vyd. Praha: Computer Press, 1997. 401 s. ISBN 80–7226-021–9.
- [3] ANSYS, ANSYS 13 Help. 2011. Dostupný jako součást programu.
- [4] Internetové stránky zabývající se MKP:  
[http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources\\_old/mmkp/node4.html](http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources_old/mmkp/node4.html)
- [5] Materiál poskytnutý firmou Huisman-Itrec. Stiffeners. 2008.

## 10 Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce **Ing. Zdeňku Porubovi, Ph.D.** za jeho čas, zkušenosti a všechny názory, které byly neocenitelné při tvorbě této práce.